

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ante Ninić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

Student:

Ante Ninić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, služeći se znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje uz pomoć navedene literature. Ovom prigodom želio bih se zahvaliti prof. dr. sc. Branku Baueru na stručnoj pomoći, savjetima i strpljenju. Također se zahvaljujem svim djelatnicima Laboratorija za ljevarstvo i njihovoj pomoći u praktičnom dijelu rada. Zahvaljujem i svim djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje koji su na bilo koji način doprinjeli ovom radu te svojim prijateljima i obitelji.

Ante Ninić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: ANTE NINIĆ Mat. br.: 0035173031

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ VRSTE ULJEVNOG SUSTAVA NA KVALITETU LIJEVANE ALUMINIJSKE PLOČE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **EFFECT OF GATING DESIGN ON THE QUALITY OF CAST ALUMINIUM PLATE**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti pravila lijevanja aluminijskih legura i prikupiti podatke o konstrukciji i izradi uljevnog sustava za jednokratni pješčani kalup.
Za zadani odljevak potrebno je konstruirati CAD model sa horizontalnim i vertikalnim uljevnim sustavom.
Napraviti simulaciju u programskom paketu QuikCAST. Analizirati i usporediti kvalitetu odljevaka.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Branko Bauer

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJ	2
2.1 Primjena aluminija.....	2
2.2 Svojstva aluminija	3
2.3. Legure aluminija	4
2.3.1. Legure Al – Si	4
2.3.2. Legure Al - Si – Cu	5
2.3.3. Legure Al – Zn - Si	5
2.3.4. Legure Al – Mg.....	5
3. PRAVILA LIJEVANJA.....	6
3.1. Kvaliteta metalne taljevine	6
3.2. Površinske turbulencije	9
3.3. Oštećivanje taljevine njenim zaustavljanjem.....	12
3.4. Plinska poroznost	13
3.5. Plinovi iz jezgre	17
3.6. Poroznost uslijed skupljanja	20
3.6.1. Volumne promjene tijekom hlađenja i skrućivanja odljevaka	20
3.7. Oštećenje konvekcijom	23
3.8. Segregacija	23
3.8.1. Pojavljivanje pogreške	23
3.9. Zaostala naprezanja.....	26
3.10. Točke stezanja	29
4. SIMULACIJE.....	32
4.1. Prikaz mogućnosti nastanka poroznosti za odljevke lijevane vertikalnim uljevnim sustavom.....	35

4.2. Prikaz mogućnosti nastanka poroznosti za odljevke lijevane horizontalnim uljevnim sustavom	40
5. SIMULACIJE I EKSPERIMENTALNI DIO (odabranih uljevnih sustava).....	42
5.1. Izrada kalupa za lijevanje.....	49
5.2. Analiza poroznosti odljevka	57
5.3. Analiza rezultata lijevanja	59
6. ZAKLJUČAK	60
LITERATURA.....	61
PRILOZI	62

POPIS SLIKA

Slika 1: Prikaz relativne topljivosti vodika u aluminiju [5]	8
Slika 2: Nastanak turbulencija u metalima [8]	9
Slika 3: Lijevanje iz lonca (v - brzina taljevine na udaljenosti h, g - gravitacijsko polje, h - udaljenost od razine taljevine u loncu) [8]	10
Slika 4: Površinske turbulencije rastaljenih metala [8]	11
Slika 5: Horizontalno punjenje velikih ravnih odljevaka [5]	12
Slika 6: Pravilna izvedba razvodnika i ušća [8]	13
Slika 7: Mehanizam nastajanja plinskih mjehura iz organski vezanih jezgrenih materijala [9]	17
Slika 8: Tijek razvijanja plina različitih jezgrenih materijala za 2 g pokusne tvari pri zagrijavanju na 850 °C (brzina nastajanja plina) [9]	18
Slika 9: Tijek razvijanja plina različitih jezgrenih materijala za 2 g pokusne tvari pri zagrijavanju na 850 °C (brzina nastajanja plina) [9]	19
Slika 10: Stezanje pri lijevanju [10]	21
Slika 11: Utjecaj temperature i vremena zadržavanja na uklanjanje zaostalih naprezanja u odljevcima od nelegiranog sivog lijeva [8]	27
Slika 12: Potencijalne točke stezanja [5]	29
Slika 13: Odljevak bez oslonaca i s osloncima za stezanje [13]	30
Slika 14: Površine za oslanjanje [13]	30
Slika 15: Oblikovanje odljevka na mjestu bušenja [13]	31
Slika 16: Položaj obrađivanih površina [13]	31
Slika 17: Dimenzije odljevka	32
Slika 18: Vertikalni uljevni sustav s ušćem odozdo uz popunjavanje kalupne šupljine	33
Slika 19: Vertikalni uljevni sustav sa ušćem odozdo – uljevanje preko pojila	33
Slika 20: Stepnasti vertikalni uljevni sustav s uljevanjem izravno iz spusta	34
Slika 21: Stepnasti vertikalni uljevni sustav s uljevanjem iz vertikalnog razvodnika	34
Slika 22: Poroznost u odljevcima s uljevanjem odozdo	35
Slika 23: Poroznost u odljevcima sa stepenastim uljevnim sustavom	35
Slika 24: Vjerojatnost pojave poroznosti u odljevcima s uljevanjem odozdo	36
Slika 25: Vjerojatnost pojave poroznosti u odljevcima sa stepenastim uljevnim sustavom	36
Slika 26: Prikaz punjenja kalupa izravnim uljevanjem i uljevanjem preko pojila	37
Slika 27: Prikaz punjenja kalupa za stepnasti uljevni sustav	37
Slika 28: Horizontalni uljevni sustav s jednim ušćem	38
Slika 29: Horizontalni uljevni sustav s dva ušća	38
Slika 30: Horizontalni uljevni sustav s dva ušća ušća smještenih s bočne strane odljevka	39
Slika 31: Poroznost u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom s jednim ušćem	40
Slika 32: Poroznost u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom s dva ušća	40
Slika 33: Poroznost u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom s dva ušća smještenih s bočne strane odljevka	41
Slika 34: Vertikalni uljevni sustav s ušćem odozdo	42
Slika 35: Vertikalni uljevni sustav sa ušćem odozdo i pojilom	43

Slika 36: Poroznost u odljevcima s ulijevanjem odozdo s i bez pojila	44
Slika 37: Vrijeme do solidusa u dvije različite varijante vertikalnog uljevnog sustava s i bez pojila	44
Slika 38: Završna mjesta skrućivanja u dvije različite varijante vertikalnog uljevnog sustava sa i bez pojila.....	45
Slika 39: Horizontalni uljevni sustav s jednim ušćem	46
Slika 40: Horizontalni uljevni sustav s jednim ušćem i toplim pojilom	46
Slika 41: Poroznost u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom s jednim ušćem i toplim pojilom te bez njega	47
Slika 42: Poroznost u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom s jednim ušćem i toplim pojilom te bez njega - 2D prikaz	47
Slika 43: Vrijeme do solidusa u dvije različite varijante horizontalnog uljevnog sustava s jednim ušćem s toplim pojilom i bez njega	48
Slika 44: Završna mjesta skrućivanja u dvije različite varijante horizontalnog uljevnog sustava s i bez toplog pojila	48
Slika 45: Izgled vertikalnog uljevnog sustava u kalupu s pojilom (a) i bez pojila (b)	49
Slika 46: Izgled horizontalnog uljevnog sustava u kalupu s toplim pojilom (a) i bez pojila (b)	50
Slika 47: Nanošenje modelnog i dopunskog pijeska (a) i sabijanje kalupne miješavine (b)	50
Slika 48: Izgled vertikalnog uljevnog sustava u kalupu s pojilom (a) i bez pojila (b) nakon vađenja modela	51
Slika 49: Izgled horizontalnog uljevnog sustava u kalupu s toplim pojilom, gornji kalup (a) i donji kalup (b) nakon vađenja modela	51
Slika 50: Izgled horizontalnog uljevnog sustava u kalupu, gornji kalup (a) i donji kalup (b) nakon vađenja modela.....	52
Slika 51: Izgled kalupa spremnih za lijevanje za vertikalni uljevni sustav	52
Slika 52: Izgled kalupa spremnih za lijevanje za horizontalni uljevni sustava, s toplim pojilom (a) i bez toplog pojila (b)	53
Slika 53: Izgled peći za taljenje aluminija (a) i prikaz temperature peći (b).....	53
Slika 54: Odstranjivanje nečistoća iz taljevine (a) i prikaz temperature taljevine (b)	54
Slika 55: Zagrijavanje lijevarskog lonca (a) i prikaz temperature taljevine neposredno prije lijevanja (b)	54
Slika 56: Lijevanje rastaljenog aluminija u horizontalni uljevni sustav (a) i lijevanje rastaljenog aluminija u vertikalni uljevni sustav (b).....	55
Slika 57: Izgled kalupa nakon lijevanja (a) i rastresanje kalupa (b)	55
Slika 58: Izgled odljevaka nakon lijevanja sa svim elementima uljevnog sustava	56
Slika 59: Prikaz odljevaka spremnih za radiografsko ispitivanje na rentgenu	57
Slika 60: Radiogram odljevaka dobivenih vertikalnim uljevnim sustavom s pojilom (VP) i bez njega (V)	58
Slika 61: Radiogram odljevaka dobivenih horizontalnim uljevnim sustavom s pojilom (HP) i bez njega (H).....	58
Slika 62: Poroznost skupljanja za vertikalni uljevni sustav vidljivi na poprečnom presjeku	59

POPIS TABLICA

Tablica 1. Specifikacije aluminija [3]	3
--	---

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ	kg/m ³	Gustoća
T	°C	Temperatura
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
I	%	Istezljivost
t	s	Vrijeme
T	N/m	Površinska napetost
v	m/s	Brzina
v_{krit}	m/s	Kritična brzina
H	m	Visina
V_c	dm ³	Volumen odljevka
V_f	dm ³	Volumen pojila
M_f	mm	Modul pojila
M_c	mm	Modul odljevka
r	mm	Radijus
g	m/s ²	Gravitacijsko polje
p	N/m ²	Tlak
α	%	Volumno stezanje
ε	%	Efikasnost pojila

SAŽETAK

U radu su navedena i opisana pravila lijevana aluminijskih legura i prikupljeni podatci o konstrukciji i izradi uljevnog sustava za jednokratni pješčani kalup.

U teoretskom dijelu ovog rada opisano je deset pravila lijevanja kako bi odljevci bili što veće kvalitete i kako bi se izbjegla pojava grešaka prilikom lijevanja. Izrađeno je više CAD modela vertikalnog i horizontalnog uljevnog sustava te su izvršene njihove simulacije lijevanja i skrućivanja u simulacijskom programu QuickCAST. Odabrane su najčešće verzije vertikalnog i horizontalnog uljevnog sustava te su isti uljevni sustavi poboljšani kako bi se usporedili rezultati kvalitete lijevanja sa simulacijama. Nakon toga izrađeni su drveni elementi uljevnih sustava dimenzija korištenih u simulaciji, pomoću kojih su izrađeni kalupi od svježe kalupne mješavine u koje su lijevani stvarni odljevci.

Na kraju eksperimentalnog dijelu rada može se zaključiti da je dobra podudarnost rezultata simulacije i stvarnog lijevanja.

Ključne riječi: odljevak, pravila lijevanja, aluminijske legure

SUMMARY

In this paper are listed the rules of casting aluminum alloy and described all data for the construction and development of the gating system for one-sand mold are collected.

Theoretical part of this work have studied ten rules of castings for making high quality casting and to avoid the occurrence of errors during casting. We made several CAD models of vertical and horizontal gating system, and performed their simulation of casting and solidification in simulation program QuickCAST. Chosen are the most common version of the vertical and horizontal gating system, and we have the same filler systems improve to compare results of quality casting. Wooden patterns of gating system were manufactured in dimensions used in the simulation.

They are made wooden models runners measuring system used in the simulation, with which they made in real castings. Models for casting of real castings were made using green and sand mixture.

Simulation results are in good agreement with the casting results.

Key words: casting, rules of casting, aluminium alloy

1. UVOD

Lijevanje je jedna od tehnologija oblikovanja predmeta od metala kojom se rastaljeni metal (taljevina) oblikuje ulijevanjem u kalupe. Metal poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine i zadržava ga nakon skrućivanja.

Tehnologija lijevanja jedan je od najstarijih i najdjelotvornijih načina oblikovanja proizvoda. Visoka produktivnost i laka mogućnost izrade replika čine je iznimno pogodnom za serijsku i masovnu proizvodnju. Zbog velike proizvodnosti pogodna je i za automatizaciju. Ona je često puta i jedina tehnologija za izradu vrlo složenih dijelova s unutarnjim šupljinama (npr. blokova motora i dr.), ili za velika i masivna kućišta strojeva. Tehnologijom lijevanja moguće je dijelove strojeva, koji bi se inače morali raditi iz više komada, odliti u jednom. Oblikovanje se vrši u tekućem stanju, a tekući metal (taljevina), kao i sve tekućine, zahtijeva minimalni utrošak energije za promjenu oblika, pogotovo što se kao uljevna sila najčešće koristi gravitacija. Ukupni utrošak energije ipak je znatan, jer materijal prethodno treba rastaliti. Iskorištenje energije bit će povoljnije što je oblik složeniji, budući da utrošena energija ovisi o utrošenoj masi, a ne o složenosti oblika. Zbog toga je lijevanje nenadomjestiva tehnologija kod izrade proizvoda složenog oblika. Skrućivanje traje vrlo kratko vrijeme, tako da je moguće ostvariti visoku proizvodnost. [1]

2. ALUMINIJ

Aluminij je sjajan metal srebrno-bijele boje. Talište mu je pri 660 °C, a vrelište pri 2519 °C. Aluminij je mekan, žilav, male gustoće te je vrlo pogodan za rezanje. Sam metal je jako reaktivan, ali je zaštićen tankim prozirnim slojem oksida koji brzo nastaje u dodiru sa zrakom te ga čini korozijski postojanim. No, neotporan je na tvari koje razaraju zaštitni oksidni sloj, kao što su lužine, mort i građevno vapno. Iako nema veliku čvrstoću, postupkom precipitacijskog očvrnuća moguće je proizvesti aluminijske legure iste čvrstoće kao i mnogi čelici. Obzirom na nizak modul elastičnosti, koristi se za izradu konstrukcija koje su znatno gipkije i elastičnije od čeličnih. Također ima visoku toplinsku i električnu vodljivost. [2]

Osim toga, vrlo je pogodan za recikliranje. Za postupak recikliranja potreban je znatno manji utrošak energije nego za samu primarnu proizvodnju. Pretaljivanjem već korištenog aluminija i njegovih legura dobiva se sekundarni aluminij koji se najčešće koristi za izradu odljevaka. Toplinskom obradom aluminijskih materijala moguće je utjecati na kemijski sastav i stanje mikrostrukture te na taj način postići željena svojstva. [2]

Primarni aluminij upotrebljava se isključivo u gnječenom stanju. Na svojstva koja ovise o mikrostrukтури može se dalje utjecati toplinskom obradom. Obzirom na mekost i nisku vlačnu čvrstoću, aluminij se uglavnom upotrebljava u legiranom stanju. [2]

Kemijski element aluminij se u periodnom sustavu elemenata označava simbolom Al, atomski (redni) broj mu je 13, a atomska masa mu iznosi 26,98. U prirodi se aluminij može naći u obliku oksida i smjese oksida. Iz njih se metal izdvaja skupim elektrolitskim postupkom. [2]

2.1 Primjena aluminija

Zbog male mase i gustoće (gustoća aluminija je tri puta manja od gustoće čelika), prirodne otpornosti na koroziju i pogodnih fizikalnih svojstava za lijevanje i vučenje, aluminij ima vrlo široku primjenu u:

- avioindustriji,
- brodogradnji,
- pakiranju proizvoda (aluminijske folije, limenke...),
- svemirskoj industriji (preko 80% udjela aluminija u svemirskim letjelicama),
- prijenosu električne struje (dalekovodi),
- automobilske industriji (motor i ostali dijelovi),

- informatičkoj industriji (mobiteli, prijenosnici...),
- građevinarstvu (instalacije, građevinski elementi...). [3]

2.2 Svojstva aluminija

Neka od bitnih svojstva aluminija su:

- povoljan omjer čvrstoće i gustoće, posebno pri uporabi nekih od legura,
- najpovoljniji omjer električne vodljivosti i gustoće među svim metalima,
- uglavnom dobre livljivosti,
- velik afinitet prema kisiku,
- relativno velika korozijska postojanost,
- relativno nisko talište,
- mala gustoća,
- mogućnost postizanja različite čvrstoće ovisno o toplinskoj obradi,
- jednostavna obrada postupcima odvajanjem čestica. [3]

Tablica 1. Specifikacije aluminija [3]

Gustoća	kg/m ³	2700
Talište	°C	660
Modul elastičnosti	N/mm ²	69000
Toplinska rezljivost	10 ⁻⁶ /K	23,8
Električna vodljivost	m/Ωmm ²	36...37,8
Granica razvlačenja	N/mm ²	20...120
Vlačna čvrstoća	N/mm ²	40...180
Istezljivost	%	50...4

2.3. Legure aluminija

Tehnički čisti aluminij koji sadrži 99,0 - 99,8 % Al ne upotrebljava se za lijevanje pod tlakom, zbog slabih mehaničkih svojstava. Također pri njegovom lijevanju dolazi do niza teškoća zbog velikog volumenskog skupljanja koje iznosi ~ 6,5 %. Osim navedenog, čisti aluminij ima nisku čvrstoću i lošu livljivost. Zbog toga se jedino upotrebljava za lijevanje kada se zahtijevaju naročito dobra električna i toplinska provodljivost te povećana otpornost na koroziju.

Najčešći legirni elementi koji se dodaju čistom aluminiju su: silicij, bakar, magnezij i cink, čime se postižu posebna svojstva.

Posebna svojstva legura aluminija postižu se dodacima drugih elemenata kao što su: silicij, bakar, cink, magnezij i dr.

2.3.1. Legure Al – Si

Legure aluminija sa silicijem imaju dobru livljivost, dobra mehanička svojstva, otporne su na koroziju i mogu se zavarivati.

Za lijevanje se najčešće koriste legure eutektičkog sastava (11- 13 % Si). One imaju dobru livljivost te se upotrebljavaju za izradu složenih odljevaka s tankim stijenkama kod kojih treba izbjegavati lokalna zadebljanja. Silicij povećava livljivost i plastičnost pri visokim temperaturama i smanjuje skupljanje legure.

Od legura koje sadrže 11- 13 % silicija lijevaju se odljevci koji se toplinski ne obrađuju. Nedostatak im je otežana mehanička obrada i niža mehanička svojstva u odnosu na legure bakra i magnezija.

Legure aluminija i silicija s niskim sadržajem magnezija pogodne su za toplinsku obradu, čime se bitno poboljšavaju mehanička svojstva.

Nadeutektičke legure imaju ~ 25 % Si i stabilna svojstva na povišenim temperaturama. Uz dodatak od 0,2- 0,3 % magnezija ove legure imaju poboljšana mehanička svojstva. Dodatkom bakra ovim legurama smanjuje se tvrdoća i otpornost na koroziju.

Aluminijske legure su izrazito zastupljene u proizvodnji odljevaka tlačnim lijevom. Lagane su i gustoća im iznosi 2,65- 2,80 kg/dm³. Osim otpornosti na koroziju, aluminijske legure imaju dobru toplinsku i električnu provodljivost, dobru obradivost i nemagnetične su. Također imaju dobra mehanička svojstva i dimenzijsku stabilnost. [4]

2.3.2. Legure Al - Si – Cu

Al – Si – Cu legure imaju povišena mehanička svojstva, ali su im zbog bakra smanjena livljivost i korozijska svojstva. Ove legure su sklone stvaranju poroznosti u odljevcima. Korištenjem novih tehnologija lijevanja pod tlakom (lijevanje u vakuumu i lijevanje dodatnim tlačenjem), smanjeno je nastajanje poroznosti odljevaka, a omogućeno je da se ove legure uspješno toplinski obrađuju radi poboljšanja mehaničkih svojstava. Time je omogućena šira primjena ovih legura.

Legure aluminija s bakrom imaju dobru čvrstoću i zadovoljavajuću istezljivost. Imaju smanjenu otpornost na trošenje i dobro se strojno obrađuju. Uz povećanje udjela silicija poboljšava im se livljivost. Dodatkom 0,2- 0,5 % Ti i 0,2- 0,5 % Mg te uz provedenu toplinsku obradu, kod ovih legura postižu se visoke čvrstoće. [4]

2.3.3. Legure Al – Zn - Si

Ove legure imaju dobru livljivost, ne lijepe se za kalup, dobro se poliraju, imaju povećanu gustoću i samokaljive su. Sadržaj cinka u leguri kreće se od 7- 12 %. Za lijevanje pod tlakom upotrebljava se i čisti aluminij s 99,8 % Al. Zajednički nedostatak svih aluminijskih legura koje se upotrebljavaju za lijevanje pod tlakom je da se lijepe za kalup. Zbog smanjenja lijepljenja u ovim legurama dopušten je povećan sadržaj željeza do 1,5 %, iako se njegovo prisustvo negativno odražava na korozijsku postojanost i mehanička svojstva legure. [4]

2.3.4. Legure Al – Mg

Ove legure imaju dobru otpornost na koroziju, naročito pod utjecajem morske vode. Dobro se obrađuju rezanjem, imaju visoka mehanička svojstva i ne lijepe se na površinu tlačnog klipa pri lijevanju odljevaka.

Dodatak magnezija daje odljevcima postojan srebrni sjaj. Uz povećani dodatak magnezija narušavaju se ljevačka svojstva i pojavljuju ljevačke greške na odljevcima (usahline i tople pukotine).

Zbog šireg temperaturnog intervala kristalizacije, naročito kod legura koje sadrže oko 10 % Mg, smanjena su njezina svojstva. Ove legure su sklone oksidaciji u rastaljenom stanju, što zahtijeva primjenu složene tehnologije pri taljenju i lijevanju taljevine. Nedostatak ovih legura je smanjena livljivost, plastičnost i povećano skupljanje pri visokim temperaturama. [4]

3. PRAVILA LIJEVANJA

Izrada dobrih odljevaka traži veliku umjetnost, tim više što se proces formiranja odljevka ne može pratiti vizualno, jer taljevina ispunjava zatvoreni kalup.

Mehanička i dimenzijska svojstva te drugi posebni zahtjevi u pogledu kvalitete odljevka, postižu se skrućivanjem taljevine i promjenom agregatnog stanja, dakle procesom još uvijek nedovoljno istraženim, tako da je upravljanje kvalitetom vrlo složeno.

3.1. Kvaliteta metalne taljevine

„Neposredno prije lijevanja taljevinu je potrebno pripremiti i tretirati korištenjem najbolje trenutne prakse.“ [5]

Prije izrade odljevka rastaljeni metal koji se koristi trebao bi se očistiti od nečistoća do najvišeg mogućeg stupnja. Nema smisla razvijati sustave pojila kako bi se osigurala kvaliteta lijevanja ako je originalni materijal onečišćen. Visoka kvaliteta znači da bi trebao biti nizak stupanj, odnosno uopće bez uključaka ili zarobljenih plinova koji će raditi probleme prilikom skrućivanja. U ljevaonicama aluminijske, peć se može puniti ingotom, recikliranim ingotom i povratom iz prethodnih procesa. Neuobičajeno je započeti samo s ingotom iako je to nekad potrebno kako bi se osigurala tražena legura za neki odljevak (zrakoplovna industrija). Reciklirane aluminijske legure u pravilu imaju viši sastav željeza, koji rezultira višim stupnjem željeznih intermetalnih spojeva. [5]

Prilikom taljenja i manipulacije taljevinom neželjeznih legura treba poduzeti određene mjere da se spriječe negativni učinci. Zbog toga se u ljevaonicama aluminijskih odljevaka dodaju različita sredstva, npr. za zaštitu rastaljenog aluminijskog od oksidacije, za izdvajanje aluminijskog iz Al_2O_3 , za rafinaciju taljevine, za uklanjanje oksida aluminijskog iz taljevine te za uklanjanje nakupina aluminijskih oksida s obloge peći. Pored toga, taljevina neželjeznih ljevova obično zahtijevaju dodatnu obradu prije lijevanja u kalupe da bi se povećala njihova kvaliteta, a time i kvaliteta odljevaka. Npr. u ljevaonicama aluminijskih odljevaka provodi se otplinjavanje taljevine te se u taljevinu dodaju određena sredstva da bi tijekom skrućivanja nastala sitnozrnata struktura i da bi se modificirao oblik silicijske faze izlučene tijekom skrućivanja. Rastaljeni aluminij ima visok afinitet prema kisiku, pri čemu nastaje Al_2O_3 . Oksidni sloj na površini taljevine štiti taljevinu od daljnje oksidacije. Međutim, oksidi mogu dospjeti u odljevak gdje djeluju kao nemetalni uključci, što negativno utječe na njegova svojstva. Da bi se spriječila oksidacija, na

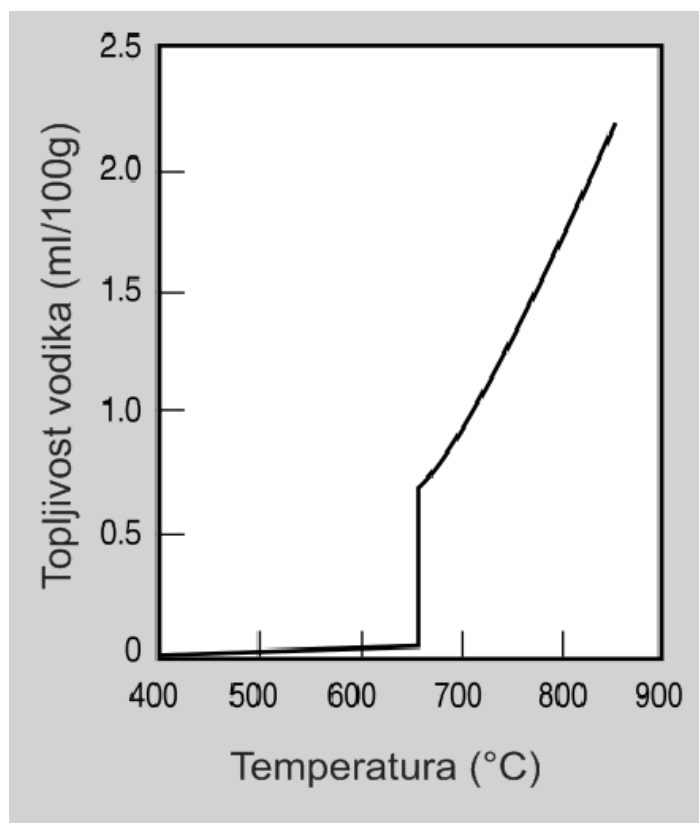
površinu taljevine aluminijske dodaju se različita sredstva (npr. mješavina NaCl i KCl uz mali dodatak fluorida Na_3AlF_6) koja se tale i na taj način sprječavaju kontakt rastaljenog aluminijske s kisikom.

Određena sredstva koja se sastoje od različitih klorida i oksidativnih komponenti dodaju se radi izdvajanja aluminijske iz Al_2O_3 . Slična sredstva dodaju se da bi se uklonili oksidi aluminijske iz taljevine. Razvijena su i rafinacijska sredstva koja omogućuju uklanjanje pojedinih metalnih elemenata iz rastaljenog aluminijske. Ta sredstva reagiraju s određenim elementima u taljevini pri čemu nastaju spojevi koji odlaze u trosku. Za uklanjanje naslaga aluminijskih oksida sa stijenki peći za taljenje također se upotrebljavaju određena sredstva.

Rastaljeni aluminij lako veže vodik. Izvori vodika mogu biti različiti, npr. atmosfera, metalni uložak, vatrostalni materijali itd. Vodik je jedini plin koji se u značajnoj količini otapa u rastaljenom aluminijske. Na slici 1 je prikazana relativna topljivost vodika u aluminijske. Budući da je topljivost vodika u krutom aluminijske vrlo niska, tijekom skrućivanja dolazi do izdvajanja plinovitog vodika. To u konačnici rezultira poroznim odljevcima. Zbog toga se rastaljene aluminijske legure moraju otpliniti prije lijevanja u kalupe ako se proizvode odljevci koji moraju imati visoku kompaktnost.

Otplinjavanje se obično provodi u prijenosnim loncima propuhivanjem taljevine inertnim plinom koji nije topljiv u rastaljenom aluminijske (tj. dušikom ili argonom). Vodik difundira u mjehure inertnog plina koji se dižu kroz taljevinu do površine i potom odlaze u atmosferu. [6]

Dušik je obično prisutan u željeznim ljevovima u udjelima od 0,005 do 0,009 % (50 do 90 ppm). Kada je udio dušika veći od navedenih koncentracija, mogu se pojaviti greške u ili na odljevcima (plinska poroznost). Nastale šupljine nisu pravilnog oblika, za razliku od sferičnih šupljina koje nastaju zbog povišenog udjela vodika i okomite su na površinu odljevka. Na unutarnjoj površini nastalih šupljina prisutan je kontinuirani ili diskontinuirani grafitni film. Djelovanje dušika može se neutralizirati dodatkom aluminijske ili titana [7].



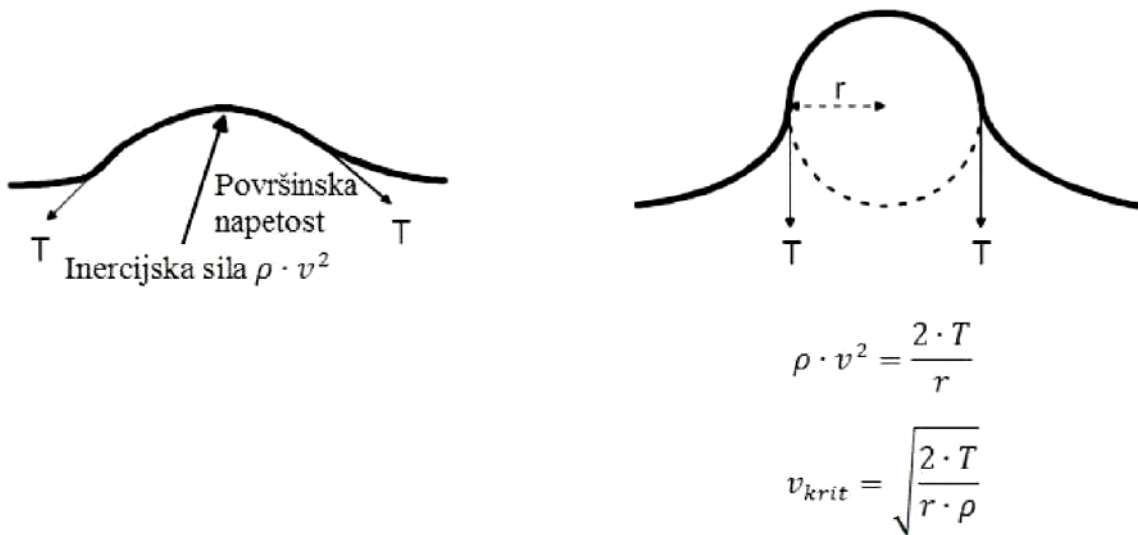
Slika 1: Prikaz relativne topljivosti vodika u aluminiju [5]

U željeznim legurama, uzrok loše kvalitete su uključci. Oni mogu biti endogene prirode poput oksida, sulfida, nitrida, ili kompleksni spojevi sva tri. Skoro uvijek određuju mehanička svojstva. Egzogeni uključci često su rezultat raspada prljavština unutar taljevine. Današnje ljevaonice sve više koriste sustav filtracije, tako se oni ne pojavljuju često u kvalitetnim ljevaonicama. Oksidi se mogu smanjiti dezoksidacijom aluminijem ili silicijem, sulfidi se mogu kontrolirati rafiniranjem procesa. Često se osigurava dovoljni udio mangana kako bi se stvorili uključci MnS koji se otapaju na nižoj temperaturi nego FeS. Kompleksni silikati se također stvaraju kao prljavština na površini taline. S nodularnim lijevom, korištenje magnezija kako bi se stvorila nodularnost grafitne faze stvara probleme putem formacije kompleksnih stabilnih magnezijevih oksida i silikata. Ovi se problemi povećavaju s turbulentim punjenjem.

Kod bakrenih legura najveći problem kvalitete dešava se zbog kisika, koji stvara eutektik s bakrom s kompozicijom 0,39 % kisika. Cu_2O stvara unutarnje, endogene uključke oksida. Ovo se može kontrolirati dodavanjem elemenata koji tvore okside brže nego bakar, npr litij, bor, magnezij ili fosfor. [5]

3.2. Površinske turbulencije

Pojam kritične brzine jednostavnije je objasniti ako se u obzir uzme pojednostavljeni pristup stvaranja površinskih turbulencija u rastaljenom metalu. Slikom 2. prikazan je presjek taljevine na koju okomito djeluje poremećaj. Na lijevoj slici prikazano je stvaranje vala uzrokovano inercijskim tlakom približne vrijednosti $\rho \cdot v^2$, gdje je ρ gustoća rastaljenog metala, a v brzina podražaja. Krajnji oblik je u obliku kapljice radijusa r , ali je ograničen površinskom napetosti T .



Slika 2: Nastanak turbulencija u metalima [8]

Granični uvjet je vidljiv kada je inercijska sila u ravnoteži sa silom površinske napetosti, to jest kada vrijedi:

$$\rho v^2 = \frac{2T}{r} \quad (1)$$

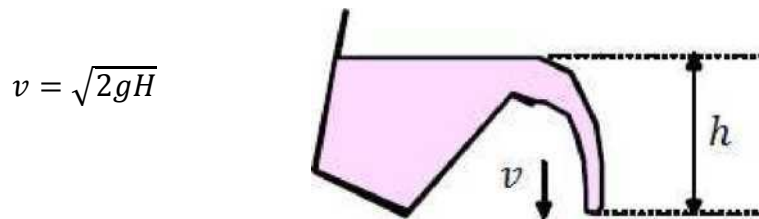
tako da se kritična brzina, v_{krit} , može definirati kao:

$$v_{krit} = \sqrt{\frac{2T}{r\rho}} \quad (2)$$

Aluminijske taljevine imaju gustoću u iznosu od 2700 kg/m^3 , sila površinske napetosti je 1 N/m te se pretpostavlja radijus aluminijske kapljice u iznosu od $0,005 \text{ m}$. [8]

$$v_{krit} = \sqrt{\frac{2}{0.005 * 2700}} = 0,38 m/s$$

Na slici 3. prikazano je izlivanje taljevine iz lonca te način određivanja brzine taljevine na udaljenosti h od razine taljevine u loncu.



Slika 3: Lijevanje iz lonca (v - brzina taljevine na udaljenosti h , g - gravitacijsko polje, h - udaljenost od razine taljevine u loncu) [8]

Za aluminij se uzima v_{krit} u iznosu od oko 0,5 m/s, a utvrđen je isti iznos i za druge materijale. To je zato što se povećanjem gustoće ρ povećava i sila površinske napetosti T , tako da omjer T/ρ ostaje približno jednak. Stoga, navedene vrijednosti v_{krit} daju naznaku kritične brzine rastaljenog metala u kalupu. Ukoliko se te vrijednosti prekorače, površina metala će se početi ponašati na turbulentan način, odnosno postojat će opasnost od stvaranja površinskih valova ili kapljica koje mogu uzrokovati nastajanje oksidnog filma. Važno je dobiti osjećaj o tome kako je lako postići kritičnu brzinu. To se može vidjeti iz jednostavne energetske bilance potencijalnih i kinetičkih energija. Prilikom strujanja metala s visine h , njegova brzina postaje:

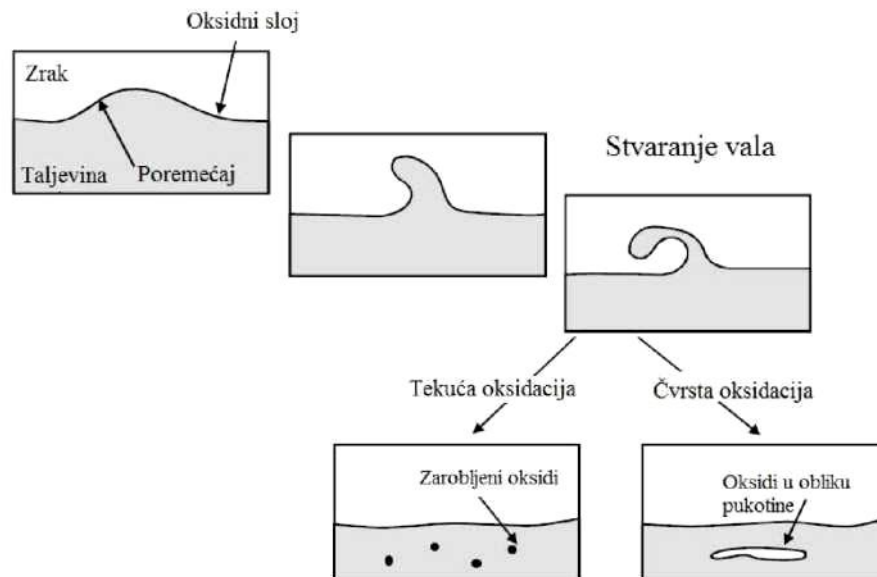
$$v = \sqrt{2gH} \quad (3)$$

Ako se uzme v_{krit} u iznosu od 0,5 m/s, kombinacijom jednačbi (2) i (3) dobije se kritična visina ulijevanja:

$$h_{krit} = \frac{v_{krit}^2}{2g} = 12.7 \text{ mm} \quad (4)$$

Time se dolazi do zaključka da ukoliko samo jednom metal padne s visine od 12,7 mm, postiže kritičnu brzinu, odnosno sadrži dovoljno energije da turbulencijama razbije površinsku napetost te uzrokuje oštećenja na odljevku. To znači da nije moguće ispuniti kalup ulijevanjem s vrha kalupa, već je jedino rješenje ispuniti kalup s dna. [8]

Prilikom brzog ulijevanja rastaljenog metala u kalup javljaju se turbulencije. Stoga je neizbježno da se oksidni sloj preklapa preko sebe samoga te se javlja kontakt između dvaju oksida prikazan slikom 4. Kako taljevina teče oksidni sloj se neprestano razvlači, puca pa se ponovno širi. Pri ulijevanju sivog lijeva javljaju se drugačije pojave. Rastaljeni silikatni slojevi se prilikom međusobnog dodira mogu spojiti te stvoriti kapljice koje obično isplutaju na površinu. Ukoliko i ostanu zarobljene unutar željeza, imaju oblik koji ne narušava svojstva. [8]



Slika 4: Površinske turbulencije rastaljenih metala [8]

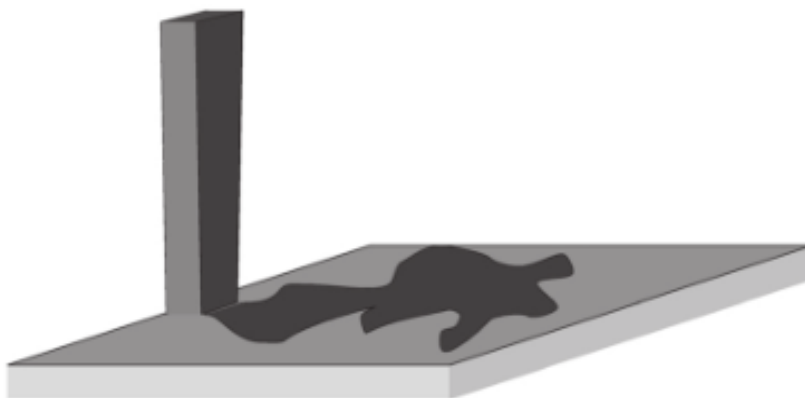
Pri ulijevanju aluminijske taljevine, kruti oksidni slojevi također dolaze u dodir. No, oni se međusobno ne vežu, nego prilikom skrućivanja ostaju zarobljeni te čine pukotinu. Te pukotine predstavljaju mehaničke nedostatke odljevka koji će rezultirati manjom pouzdanosti prilikom upotrebe. Ukoliko se izrađuju odljevci koji bi trebali sadržavati tekućine ili plinove, moguće je da će doći do propuštanja kroz stijenke odljevka. Nažalost, radi loše prakse ulijevanja, aluminijski odljevci imaju nezavidnu reputaciju zbog sklonosti propuštanja. [8]

3.3. Oštećivanje taljevine njenim zaustavljanjem

„U nijednom trenutku se taljevina ne smije zaustaviti.“ [5]

Ako se u bilo koje vrijeme tijekom punjenja taljevina prestane gibati, oksidni sloj može povećati svoju debljinu. Ako se oksidi dovoljno dugo formiraju, prednji dio taljevine možda se neće moći više kretati ili metal može izbiti u mlazovima.

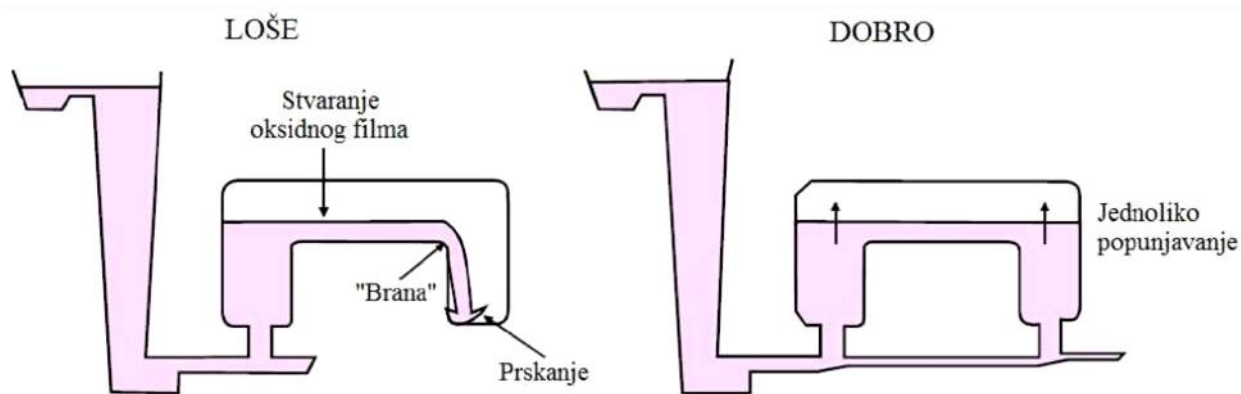
Oksidni film zarobljen je onda u velikom dijelu taljevine i može često postojati kroz cijelu debljinu materijala. Tada je to dupli film oksida koji se ponaša poput pukotine. Ovo se često događa kada se veliki ravni odljevci pune horizontalno prikazano što je prikazano na slici 5



Slika 5. Horizontalno punjenje velikih ravnih odljevaka [5]

Drugi primjer je takozvani efekt slapa. Kako se kalup puni, dolazi do prelijevanja taljevine preko „brane“ te se javlja prskanje koje uzrokuje oksidaciju. Naročito je loše ukoliko visina pada premašuje ranije navedenu visinu od 12,7 mm za aluminij. Za vrijeme dok se puni najudaljeniji dio kalupa, taljevina je u središnjem dijelu kalupne šupljine statična. Stoga njezin površinski oksidni sloj postaje sve deblji i bit će ga sve teže i teže ukloniti.

Nakon što se napuni najudaljeniji dio kalupa, taljevina se preklapa preko nastalog oksidnog sloja pa tvrdi oksidni sloj ostaje zarobljen. [5]



Slika 6: Pravilna izvedba razvodnika i ušća [8]

Kao rješenje ovog problema moguće je koristiti dva ušća kao što je prikazano na desnoj strani slike 6. Prilikom punjenja taljevina ravnomjerno ispunjava kalupnu šupljinu pri čemu ne nastaje preklapanje oksidnog sloja. Za kalupe s više izoliranih niskih točaka, potrebno je koristiti ušće za svaku pojedinu točku. [8]

3.4. Plinska poroznost

Ova se pogreška susreće najčešće kod aluminijskih, magnezijjskih i bakrenih legura, ali i kod čeličnog lijeva, nezavisno od postupka kalupljenja. Međutim, odljevci od željeznog lijeva su zbog općenito drugačije metalurgije tog materijala skloniji plinskim mjehurima.

Pogreške pojačano nastaju kod legura s velikim područjem skrućivanja, zavisno od karakteristike skrućivanja, i vrlo su često udružene s poroznošću, mikrousahlinama, poroznošću od stezanja, površinskom poroznošću, oksidnim uključcima i sl. zbog toga su ugrožene i legure slabije tečljivosti. Pritom su najviše pogođena mjesta s debelostjenim područjima, prijelazi s debljih na tanje stijenke i područja u blizini ušća. [9]

Plinska se poroznost često uočava tek nakon ispitivanja nepropusnosti odljevka ili nakon strojne obrade. U ovom posljednjem slučaju pogreška je većinom vidljiva golim okom, no očit je dokaz moguć pomoću metalografskog izbruska. Plinska poroznost često nastaje i pri galvanskoj površinskoj obradbi. Takva pojava pogreške uzrokuje uglavnom škart jer negativno utječe i na mahanička i na uporabna svojstva odljevka.

Proizvođač i kupac trebali bi se dogovarati o tlačnom lijevu, koji se, kao što je poznato, zasad

gotovo ne može proizvesti bez poroznosti. Ako su utjecaji različitih poroznosti na mehanička svojstva poznati, traženi kriteriji kakvoće mogu se bolje uskladiti sa zahtjevima koji se postavljaju za odljevke. Kod tlačnog lijeva se s pomoću klasifikacijske slike poroznosti može jasno vidjeti i odrediti utjecaj različite poroznosti na mehanička svojstva. [9]

Ako se za lijevanje rabe taljevine koje sadrže plin, tijekom hlađenja i skrućivanja izlučuju se otopljeni plinovi jer se njihova topljivost smanjuje s padom temperature. Iako velik dio plina može ishlapiti, ipak ostaju uključeni ostatci plina najčešće pri skrućivanju odljevka, koji zatim u strukturi tvore pore.

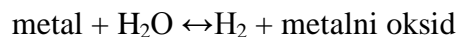
Taljevina se obogaćuje plinom (tiče se prije svega Al-Si i bakrenih legura):

- zbog apsorpcije plina tijekom taljenja iz zračne i pećne atmosfere,
- zbog uporabe plinom zasićenih, vlažnih ili oksidiranih zasipnih materijala,
- zbog vlažne pećne obloge, vlažnog materijala tignja ili lonca i alata,
- zbog nestručna pretakanja i neprikladna transporta od talioničke peći do peći za održavanje topline,
- zbog neprovođenja otplinjivanja nakon pretakanja u peć za održavanje topline.

Za apsorpciju plina tijekom ulijevanja mjerodavni su sljedeći utjecajni čimbenici:

- istodobno usisavanje zraka tijekom ulijevanja ako se uljevnj sustav ne održava punim,
- prejak strujanje taljevine u razvodniku i ušću,
- nedovoljno odzračivanje kokile, odnosno kalupne šupljine,
- preoštri uglovi i bridovi ili ako ih je previše u uljevnom sustavu i odljev- ku (to prije svega vrijedi za tlačni lijev),
- ako su pretanke stijenke (tlačni i kokilni lijev),
- (za tlačni lijev) ako je prevelika brzina klipa u prvoj fazi, zbog čega taljevina može biti izbačena kroz otvor za punjenje uljevne komore, što bi za posljedicu moglo imati vrtloženje taljevine sa zrakom, isto tako ako je vremenski neusklađen tijek odvijanja hidrauličnih faza pri punjenju kalupa, ako su nedovoljno djelotvorni preljevi te ako je preobilno i nejednolično podmazivanje klipa, premala brzina taljevine u ušćima i premalen završni tlak tijekom treće faze. [9]

Plinsku poroznost mogu prouzročiti i reakcije kalupa i taljevine. Pritom npr. taljevina može pri ulijevanju reagirati s vodom sadržanom u pješčanim kalupima. Toplina pri lijevanju prvo uzrokuje nastanak vodene pare, ta se vodena para može reducirati rastaljenim metalom, pri čemu nastaju vodik i metalni oksidi (zbog toga plinska poroznost često nastaje zajedno s oksidnim uključcima):



Vodena para uzrokuje nastanak mjehurastih uključaka u odljevku, odnosno najčešće na njegovoj površini (poroznost rubnih zona).

Tako se debelostjeni odljevci od oplemenjenih legura AlSi9Mg i AlSi7Mg mogu lijevati s malo pora samo u bezvodnim kremenim pijescima vezanim hladnootvrdljivom smolom. Međutim, kako je utvrđeno na stupnjovitoj ploči s visinom stupnja od 80 mm, i unatoč takvu kalupnom materijalu pri visokim temperaturama ulijevanja ili pri visokom udjelu natrija valja očekivati očit gubitak kakvoće odljevka. Suprotno tome, pri uporabi kalupnih materijala koji sadrže vodu i pri niskim temperaturama ulijevanja i malenom udjelu natrija jasno se uočava veća poroznost.

Zbog apsorpcije vodika iz kalupnih materijala koji sadrže vodu, udio vodika u taljevini nakon otplinjivanja igra tek sporednu ulogu u poroznosti. Vodik je u taljevini otopljen atomno, topljivost mu ovisi o temperaturi i obilježena je velikim skokom topljivosti pri temperaturi skrućivanja, prikazano na slici 1. Vodik koji se sa sniženjem temperature u taljevini oslobađa u molekularnom obliku, uzrokuje nastanak mjehura. Količina i raspodjela plinskih pora zavise od otopljene količine plina, od uvjeta hlađenja i od mogućnosti nukleacije mjehura (što opet zavisi od čistoće taljevine) te od isparavanja plina. Topljivost vodika određuju u ravnotežnim uvjetima sastav legure i temperatura. Tako, na primjer, legirni elementi silicij, bakar i cink smanjuju topljivost, a magnezij i natrij ju povećavaju. Pri većim brzinama hlađenja u otopini se prisilno zadržava veća količina vodika, tako da je poroznost u pješčanom lijevu veća nego u lijevu koji se izrađuje u trajnim metalnim kalupima.

Kod bakrenih ljevarskih legura prije svega prisutni fosfor pospješuje nastanak reakcija u kalupu, zbog čega bi se dezoksidacija fosforom bakrom trebala uvijek voditi tako da u taljevini spremnoj za ulijevanje ne bude previše preostalog fosfora.

I na kraju, reakcije u kalupu pri kojima nastaje plin mogu biti prouzročene i oksidacijom sulfida, pri čemu nastaje plinoviti sumporni dioksid. [9]

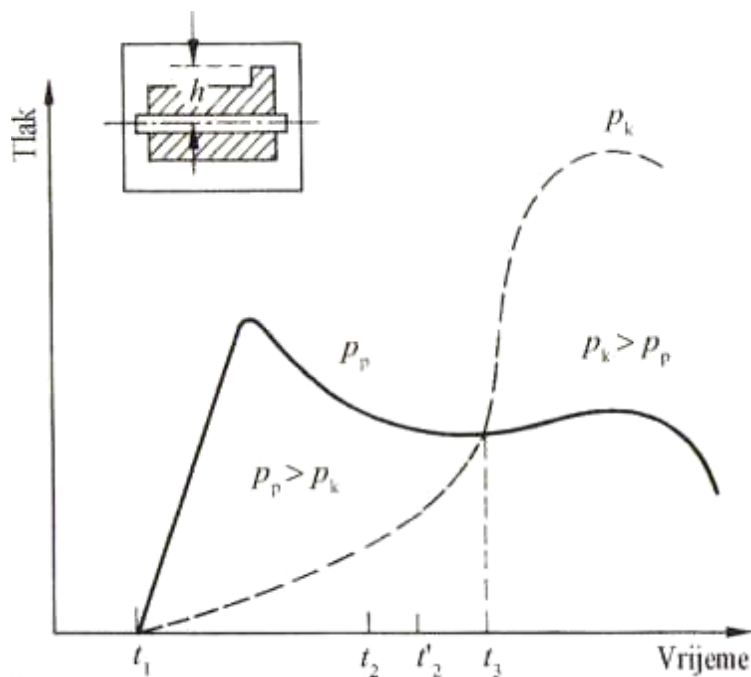
Mjere pomoći:

1. Pri taljenju valja voditi računa o tome da se rabi nezauljen, neoksidiran i suh zasipni materijal u kojem ima što manje plina i da se taljenje obavlja tako da se spriječi apsorpcija plina iz zraka ili pećne atmosfere.
2. Kod aluminijskih i bakrenih legura te kod čeličnog lijeva taljevina se mora podvrgnuti optimalnom otplinjivanju. Budući da kod lijevova obojenih metala razina udjela vodika bitno ovisi o načinu zagrijavanja peći (indukcijska kanalna peć ili plinom grijana tiganjska peć), ipak postoji potreba da se i pri pravilnom vođenju taljenja i održavanja topline ili prije ulijevanja u odgovarajućim vremenskim razmacima izvrši otplinjivanje.
3. Po mogućnosti bi trebalo povisiti temperaturu i eventualno brzinu ulijevanja. Međutim, kod nesusenih pješćanih kalupa to zahtijeva osobit oprez jer velike brzine ulijevanja, a samim tim i prejaki udar taljevine o kalupnu stijenku mogu izazvati eksplozivno nastajanje vodene pare.
4. Udio natrija u talini mora biti što niži kako bi se spriječila apsorpcija vodika iz kalupnog materijala i djelovalo preventivno protiv nukleacije mjehurića na previše mjesta.
5. Treba spriječiti svaku apsorpciju plina pri taljenju i održavanju topline te pri legiranju sve do lijevanja.
6. Spriječiti skupljanje vlage na hladilima, hladila prije sastavljanja kalupa zagrijati.
7. Ljevarske lonce i ljevarski alat valja dobro osušiti i prethodno zagrijati.
8. Kod kokilnog i tlačnog lijeva:
 - provjeriti odzračivanje kokila, otplinjivanje i obradu taljevine provoditi pažljivo i redovito,
 - provjeriti ušća i razvodnike i možda ih povećati,
 - očistiti i ponovno premazati kokile, predebeli premazi usporavaju skrućivanje i prema tome pogoduju nastanku plinske poroznosti,
 - povećati tlak lijevanja i pravovremeno promijeniti tijekom hidrauličnih faza pri punjenju kalupa,
 - štedljivije i pažljivije provoditi podmazivanje stapa i kalupa,
 - neizbježna skretanja u uljevnom sustavu izvesti s dovoljno velikim polumjerima,
 - izbjegavati »prijeskočni val« manjom brzinom klipa u prvoj fazi tlačenja,
 - osigurati dovoljnu ispunjenost uljevne komore prije zaleta klipa,
 - povećati obujam preljeva. [9]

3.5. Plinovi iz jezgre

„Nikakvi mjehurići iz jezgre ne smiju proći kroz taljevinu. Materijali na bazi gline bi se trebali izbjegavati“ [5]

Jezgre se najčešće izrađuju od pijeska, ali također mogu biti od stakla ili čak čelika. Jezgre od pijeska najčešće će se vezati sa smolama te će biti permeabilne. Postoji više procesa za izradu pune ili šuplje jezgre. Nastajanje plina iz organski vezanih kalupnih materijala shematski je prikazana na slici 7.



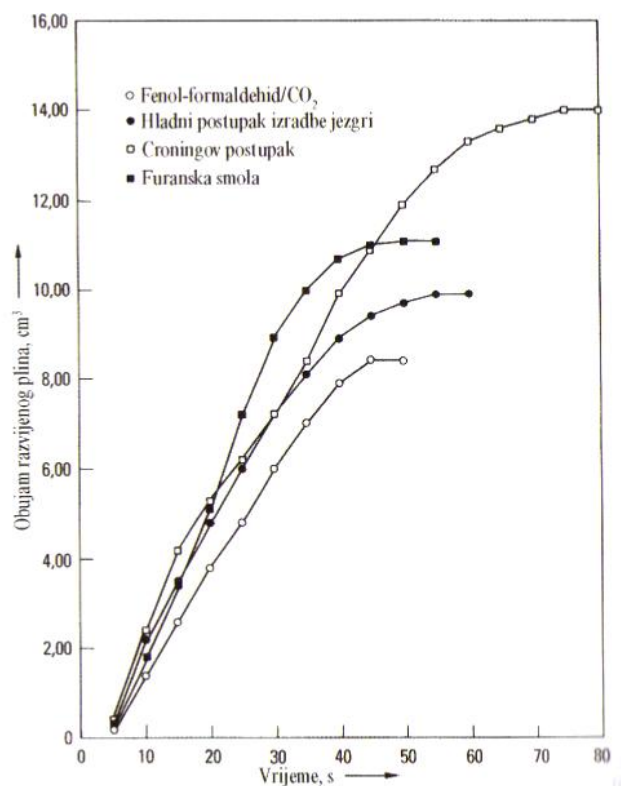
Slika 7: Mehanizam nastajanja plinskih mjehura iz organski vezanih jezgrenih materijala [9]

U trenutku t_1 taljevina prekriva jezgru, počinje razvijanje plina i nastajanje tlaka plina. Visina tlaka plina p_p ovisi o brzini nastajanja plina i plinopropusnosti kalupnog (jezgrenog) materijala. Istodobno s porastom visine ulijevanja h raste i protutlak (metalostatički tlak) taljevine p_k . U vremenskom rasponu $t_1 \dots t_3$ tlak p_p postaje veći od p_k , pa plin može prodrijeti u metal ako ga se nekom protumjerom ne odvede, npr. preko jezgrenog oslonca.

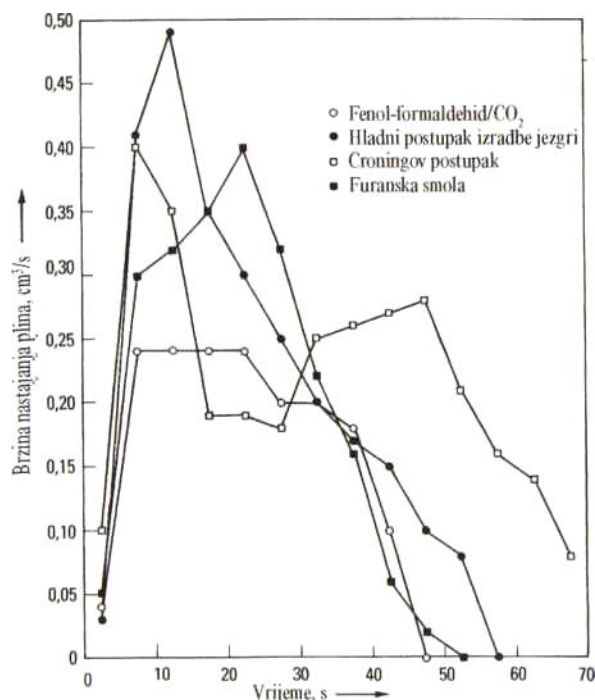
Sve do početka skrućivanja površinske kore (trenutak t_2) plin može ponovnu ishlapiti, zatim se sve do trenutka t_3 plinski mjehuri „zamrzavaju“ i kao pogreške ostaju u odljevku. Nakon t_3 vrijedi odnos p_k je veći od p_p , tj. ne postoji opasnost od prodora plina u odljevak. [9]

Odvođenje plinova iz kalupnih dijelova (jezgara) osobito je značajno kod organski vezanih kalupnih materijala jer se ta veziva tijekom ulijevanja u velikoj mjeri raspadaju, a pri tome se oslobađaju proizvodi kao što su vodik, ugljični monoksid, metan, ugljični dioksid, dušik i viši ugljikovodici.

Dinamika razvijanja plina, prije svega iz jezgrenog materijala, ima velik utjecaj na sklonost pogreškama. Slike 8 i 9 prikazuju primjere razvijanja plina (obujam plina) i plinski udar (brzinu nastajanja plina) različitih jezgrenih materijala. [9]



Slika 8: Tijek razvijanja plina različitih jezgrenih materijala za 2 g pokusne tvari pri zagrijavanju na 850 °C (brzina nastajanja plina) [9]



Slika 9: Tijek razvijanja plina različitih jezgrenih materijala za 2 g pokusne tvari pri zagrijavanju na 850 °C (brzina nastajanja plina) [9]

Mjere pomoći za organski vezane kalupne (jezgrene) materijale:

1. Osobito paziti na što bolji jezgreni odušak, u idealnom slučaju preko jezgrenog oslonca. Najbolji su se rezultati postizali bušenjem jezgrenih oslonaca uz povećanje plinopropusnosti kalupnog materijala.
2. Rabiti minimalne udjele veziva i po mogućnosti veziva koja sporo reaguju.
3. Premazivati jezgre, ali paziti da se pritom ne premažu jezgreni oslonci i da se jezgre temeljito osuše
4. Po mogućnosti rabiti pijesak grublje zrnatosti.

Spriječiti da jezgre upiju vodu zbog nestručna skladištenja, osobito pri niskim temperaturama.

Povećanje visine lijevanja pokazalo se djelotvornim sredstvom za minimizaciju pogrešaka na odljevcima uzrokovanih mjehurima, isto kao i produljenje vremena lijevanja, kako bi jezgreni plinovi prirodnim putem mogli ishlapiti kroz kalup za lijevanje.

Kalup i jezgre koje se ulažu, moraju biti približno iste temperature, jer razlike u temperaturi mogu dovesti do stvaranja kondenzirane vode u sastavljenom kalupu. [9]

3.6. Poroznost uslijed skupljanja

Kako bi se proizveo kvalitetan odljevak treba slijediti pravila napajanja i poznavati mehanizme pomoću kojih se napajanje odvija. Poznavanje volumnih promjena koje se događaju tijekom hlađenja i skrućivanja odljevaka omogućuje pravilnu konstrukciju sustava napajanja. Nije uvijek lako postići dobro napajanje, a neuspjeh neminovno dovodi do stvaranja poroznosti uslijed skupljanja.[10]

3.6.1. Volumne promjene tijekom hlađenja i skrućivanja odljevaka

Pri punjenju kalupne šupljine taljevina dolazi u kontakt s kalupnim materijalom. Temperatura taljevine u kalupu postepeno opada zbog odvođenja topline kroz stjenke kalupa prema okolini. Kada se dostigne likvidus temperatura započinje skrućivanje, odnosno fazna pretvorba iz tekućeg u kruto stanje. Tijekom skrućivanja, zbog povećanja gustoće dolazi do diskontinuirane promjene volumena, odnosno smanjenja volumena (skupljanja). Zbog smanjenja volumena, na mjestu koje zadnje skrućuje u odljevku nastaje usahlina ili šupljina. Da bi se izbjegla prisutnost ove greške u odljevku, očito je da se tijekom skrućivanja odljevka mora kompenzirati dotok taljevine iz vanjskog priljevnog dijela koji se naziva pojilo. [10]

Kod većine ljevačkih legura razlikuju se tri područja volumnih promjena u odljevku koje se događaju tijekom hlađenja od temperature koju taljevina ima nakon završetka ulijevanja u kalupnu šupljinu do sobne temperature, prikazano na slici 10.

Postoje tri tipa stezanja pri lijevanju:

1. stezanje u tekućem stanju, odnosno smanjenje volumena taljevine tijekom hlađenja od temperature koju taljevina ima u kalupu nakon završetka ulijevanja do likvidus temperature tj. početka skrućivanja
2. stezanje tijekom skrućivanja, odnosno smanjenje volumena tijekom hlađenja od likvidus do solidus temperature
3. stezanje u krutom stanju, odnosno smanjenje volumena tijekom hlađenja odljevka od solidus temperature do sobne temperature.

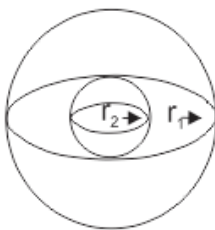
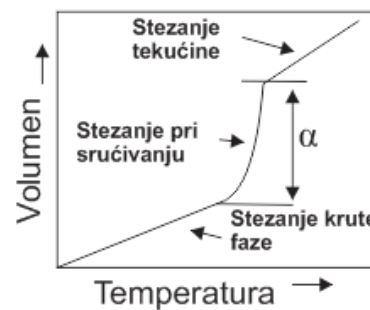
Od navedenih, transformacija iz tekućeg u kruto je najkritičnija. U pravilu, to je stezanje tj. metal se skuplja kako se skrućuje. Uobičajna vrijednost volumnog stezanja za aluminij iznosi 7% .

Iako se 7% skupljanja možda ne čini jako puno, poučno je razmotriti jednostavnu matematičku obradu skrućivanja kugle. Ona pokazuje da se u centru kugle stvara praznina (šupljina) od 41% izvornog promjera kugle. Da bi odljevak bio dobar, ova praznina se mora popuniti što u praksi često predstavlja veliki problem. Ovakva greška stezanja može se spriječiti upotrebom spremnika rastaljenog metala (pojila). [10]

STEZANJE PRI LIJEVANJU

Postoje tri tipa stezanja:

- Stezanje tekućine
- Pretvaranje tekućeg u čvrsto stanje
- Stezanje krutog stanja



$$\text{Volumen kugle} = \frac{4}{3}\pi r_1^3$$

$$\text{Volumen stezanja} = \frac{4}{3}\alpha\pi r_1^3 = \frac{4}{3}\pi r_2^3$$

$$r_2 = \alpha r_1^{1/3}$$

Na primjer za Al $\alpha = 7\%$ $r_2 = 0.41 r_1$
tj. 7% stezanja stvara prazninu koja ima
polumjer od preko 40 % kugle

Slika 10: Stezanje pri lijevanju [10]

Kako bi pojilo bilo efektivno potrebno je da se ono skruti zadnje. Kako bi se izračunalo koliko je pojilo veliko, potrebno je izračunati koliko će trajati skrućivanje odljevka. Ljevaonice koriste empirijske verzije ove formule poznate kao Chvorinovo pravilo te je prikazano jednadžbom:

$$t_r = C \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (5)$$

Ova jednadžba pokazuje činjenicu da je vrijeme skrućivanja za odljevak povezano s konstantom C i kvadratom omjera površine hlađenja i volumena odljevka. Omjer se također zove modul (M) i mjerna jedinica mu je duljinska. Što je veći modul to treba više odljevku da se skruti. Na taj način se izračunava pojilo osiguravajući pritom da je dovoljno velikog modula tj većeg od modula odljevka. [5]

Tijekom skrućivanja odljevka dio taljevine prelazi iz pojila u odljevak, zbog čega se uslijed stvaranja usahline u pojilu povećava površina pojila, odnosno površina preko koje se odvodi toplina. Zbog toga je nakon zavšetka skrućivanja modul pojila oko 17 % manji od početnog modula pojila. Upravo je to razlog zašto modul pojila mora biti 1,2 puta veći od modula odljevka ili dijela odljevka što ga pojilo napaja. [11]

Potrebni volumen može se izračunati iz volumnog stezanja, α , i volumena odljevka (V_c) i pojila (V_f), tako da je:

$$\text{Potrebni volumen} = \alpha (V_c + V_f) \quad (6)$$

To se osigurava s pojilom, određene učinkovitosti, ε , tako da će se dobar odljevak proizvesti, ako je :

$$\varepsilon \cdot V_f \geq \alpha (V_c + V_f) \quad (7)$$

Na primjer, α za aluminij je oko 7 %, a ε za tipično pojilo oblikovano u pješčanom kalupu je 14 %. Uvrštavanje tih vrijednosti u ovaj izraz pokazuje da, kao apsolutni minimum, volumen pojila mora biti jednak volumenu odljevka. Zbog toga se vidi da aluminij ima vrlo visoki zahtjev napajanja metala, jer je iskorištenje (tj. masa odljevka kao udio težine odljevka plus pojilo) samo 50 %. Za čelike s tipičnom α vrijednosti od 3%, pojilo iste učinkovitosti bi dalo iskorištenje od preko 78 %. [10]

Još jedan način rješavanja problema skupljanja je primjena hladila.

Često je radi usmjerenog skrućivanja potrebno reducirati, tj. smanjiti modul jednog dijela odljevka s vrijednosti M_0 , na manju vrijednost M_r , pa se na takvim mjestima u kalup ugrađuju hladila koja oduzimaju dio topline od taljevine u kalupu. Hladila time lokalno mijenjaju morfologiju skrućivanja odljevka, zbog čega se na tom mjestu formira "umjetna" krajnja zona odljevka. Tako se s velikom sigurnošću može postići usmjereno skrućivanje odljevka u smjeru prema pojilima. Prema tome, osnovni zadatak hladila je da omogući povoljan temperaturni gradijent i na taj način omogućiti

napajanje kritičnog mjesta. Prema načinu djelovanja hladila se dijele na unutarnja i vanjska, a prema položaju u kalupu na gornja, bočna i donja. [11]

3.7. Oštećenje konvekcijom

„Oštećenja izazvana konvekcijom potrebno je izbjeći na način da se termalni gradijenti ponašaju u skladu s gravitacijom.“ [5]

Konvekcija može uzrokovati probleme u dijelovima odljevka koji imaju poprečni presjek srednje veličine. Opće je prihvaćeno da visokokvalitetni odljevci imaju ušće na dnu komponente. U osnovi ovo znači da je odljevak punjen suprotno u odnosu na gravitaciju, što daje kontroliran način punjenja. Stoga najtopliji dio metala u odljevku je na dnu, a najhladniji se nalazi na vrhu. Kod tankosjenih odljevaka gdje se skrućivanje odvija vrlo brzo ovo nije problem, ali gdje je površina presjeka dovoljno velika da omogući prirodnu konvekciju zbog razlike u gustoći toplije i hladnije taljevine, uzrokuje dosta teško napajanje. Rezultat toga je pojava skupljanja na različito slučajno odabranim mjestima koja se čak i povećava ukoliko se povećava pojilo. S vrlo debelim odljevcima vrijeme skrućivanja je dovoljno dugo da konvekcija okrene gradijent temperature i na taj način zadovolji kriterij usmjerenog skrućivanja.

Konveksijske struje mogu se stvoriti u relativno kratkom vremenu, minutama, tako da je ovaj problem isto definiran postupkom lijevanja. Postupci s dužim vremenom skrućivanja, poput pješčanog lijevanja, osjetljiviji su nego tlačno ili niskotlačno lijevanje. Kokilni lijev može biti osjetljiv kada se koriste pješčane jezgre ili gdje su relativno velika pojila. [5]

3.8. Segregacija

3.8.1. Pojavljivanje pogreške

U legurama koje su inače homogena sastava, a koje su izgrađene od miješanih faza, pojavljuju se mikroskopske i makroskopske razlike u sastavu. Pritom faza koja se prva skrutne ima drugačiji sastav legure nego ostatak taljevine u tom odljevku. Prateći, legirni i eventualno subverzivni elementi mogu tijekom segregacije u taljevini koja se skrućuje prouzročiti na površini zrna degeneraciju strukture i tvorbu uključaka i karbida, što može jako negativno utjecati na dinamička svojstva materijala. Te se degeneracije jasno uočavaju na metalografskom izbrusku. Metalografskim ispitivanjima na optičkom mikroskopu ne mogu se izravno odrediti anomalije, dok ispitivanja elek-

tronskom mikrosondom omogućuju da se jasno odredi smanjenje ili koncentracija elemenata na površini zrna.

Načelno se govori o makrosegregaciji i mikrosegreciji.

Makrosegregacija je lokalno ograničeno razlučivanje pri kojem nastaje odgovarajuća razlika u sastavu nekog mjesta u taljevini ili odljevku prema sastavu cjelokupne taljevine ili cijelog odljevka.

To su gravitacijska segregacija, segregacija u bloku i obratna segregacija u bloku.

Mikrosegrecija jesu razlučivanja mikroskopskog reda veličine, to su dakle izlučivanja kristala mješanaca pri čemu nastaju razlike u sastavu pojedinih kristala; ta se pojava zbog toga naziva i kristalna segregacija (razlučivanje) ili međudendritna segregacija. [9]

Oblici segregacije:

1. Gravitacijska segregacija

Gravitacijska segregacija nastaje pri znatnoj razlici u gustoći između skrutnutih primarnih kristala i ostatka taljevine; kristali veće gustoće tonu u taljevini i nakupljaju se na dnu odnosno u donjem području odljevka; kristali manje gustoće dižu se u taljevini i skupljaju na površini taljevine odnosno u gornjem području odljevka. Tako u nadeutektskim Al-Si legurama lako nastaju segregacijska područja u kojima se nakupljaju primarni silicijski kristali. To je slučaj osobito s primarnim kristalima gruboga oblika. Isto tako u taljevinama aluminijskih legura mogu se nakon duljeg održavanja topline u peći razlučiti nastali metalni spojevi visokog tališta ili dodatci za usitnjavanje zrna, koji se zbog svoje veće gustoće mogu nakupljati na dnu spremnika za održavanje topline. U nadeutektskom nodularnom i sivom lijevu može se pojaviti gravitacijsko razlučivanje, poznato kao flotacija grafita, pri kojem iz taljevine nodularnog lijeva na površinu isplivava tzv. primarni grafit. [9]

2. Segrecija u bloku

Makrosegregacija u odlivenim blokovima ili debelostjenim odljevcima nastaje zbog koncentracijskih razlika u ostatku taljevine, kad više nema gibanja kojim bi se izjednačila koncentracija pomoću već nastalih kristala. Udio legirnog sastojka koji sudjeluje u segregaciji manji je na površini odljevka nego u njegovu toplinskom središtu. [9]

3. Obratna segregacija u bloku

Ostatak taljevine, obogaćen određenom legirnom komponentom zbog izostalog izjednačenja koncentracije, potiskuje tlak skrućivanja ili usisno djelovanje kapilarnih šupljina među skrutnutim kristalima na vanjsku stranu odljevka. [9]

4. Mikrosegregacija

Ovaj oblik segregacije, koji je najčešći u stvarnim odljevcima, naziva se i kristalna segregacija ili segregacija na granici zrna, a uzrok joj je poremećaj u difuzijskom izjednačivanju između kristala mješanaca i ostatka taline. [9]

Za sprječavanje segregacije kod aluminijskih legura osobito vrijedi sljedeće. Preporučuje se brzo rastaljivanje i zagrijavanje do temperature ulijevanja. Time se oksidacija i upijanje plina zadržavaju na niskoj razini. Treba izbjegavati pregrijavanje taljevine iznad 800 °C. S druge strane, temperatura taljevine trebala bi biti znatno iznad likvidusa da bi se spriječile segregacije faza bogatih teškim metalima koje u odljevku uzrokuju tvrda mjesta. To vrijedi i za održavanje topline aluminijskih legura za tlačni lijev. I praksa dodavanja krutog materijala u peć za održavanje topline, koja se još često rabi, potpomaže navedenu segregaciju budući da temperature taljevine oko uložnog materijala tako brzo padaju da mogu nastati faze bogate teškim metalima. [9]

3.9. Zaostala naprezanja

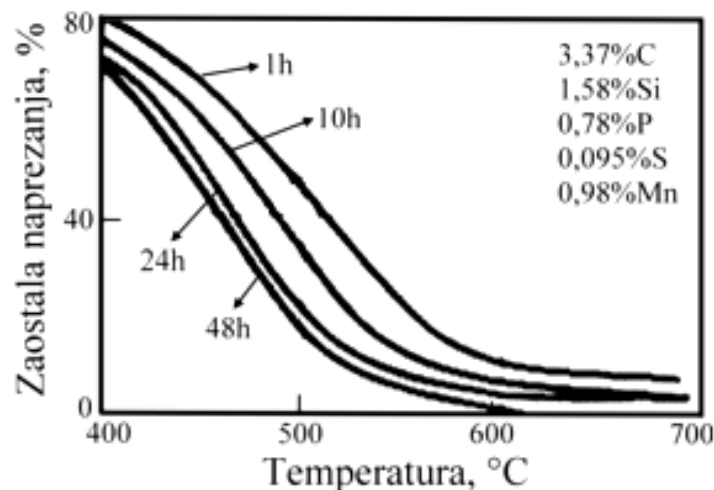
Rezidualna (zaostala) naprezanja nastaju tijekom skrućivanja i hlađenja odljevaka i uzrokovana su različitim brzinama hlađenja između različitih debljina stjenki. Rezidualna naprezanja mogu uzrokovati smanjenje čvrstoće, deformaciju, spontano pucanje odljevaka te promjenu dimenzija i dimenzijsku nestabilnost tijekom obrade ili primjene odljevka.

Rezidualna naprezanja mogu se izbjeći ili minimalizirati na sljedeći način:

- modificiranjem konstrukcije odljevka,
- lokalnim uklanjanjem pijeska u područjima debelih stjenki odljevka, da bi se postiglo jednolično hlađenje,
- ranijim istresanjem odljevaka s značajnim razlikama u debljinama stjenki i smještanjem u peć da bi se ostvarilo sporo hlađenje,
- izbjegavanjem pojave odbjela u rubovima,
- pravilnim cijepljenjem i kemijskim sastavom. [8]

Uklanjanje rezidualnih naprezanja kod sivog lijeva provodi se na temperaturama koje se nalaze ispod temperature pretvorbe ferita, odnosno perlita u austenit. Previsoke temperature i preduga zadržavanja na visokim temperaturama mogu dovesti do smanjenja vlačne čvrstoće i tvrdoće (raspad cementita u perlitu). Kod nelegiranih sivih ljevova uklanjanje zaostalih naprezanja potrebno je provesti na temperaturama od 540 - 565 °C. Sa slike 11 može se vidjeti da se ~ 70 % zaostalih naprezanja može ukloniti zadržavanjem odljevka na prethodno navedenim temperaturama tijekom 1 h. [8]

Ako se želi ostvariti potpuno uklanjanje zaostalih naprezanja (> 85 %) u odljevcima od nelegiranih sivih ljevova, temperatura mora iznositi minimalno 595 °C. Ovako visoke temperature uklanjanja zaostalih naprezanja mogu negativno utjecati na čvrstoću, tvrdoću i otpornost na trošenje. [8]



Slika 11: Utjecaj temperature i vremena zadržavanja na uklanjanje zaostalih naprezanja u odljevcima od nelegiranog sivog lijeva [8]

Kod niskolegiranih sivih ljevova obično se zahtijevaju više temperature za uklanjanje zaostalih naprezanja, tj. 595 - 650 °C, ovisno o sadržaju legirajućih elemenata. Vrijeme zadržavanja na temperaturi pri kojoj se provodi uklanjanje zaostalih naprezanja iznosi najčešće 2 - 8 h.

Kod smještanja odljevaka u peć, temperatura u peći ne može biti veća od 95 °C. Smještanjem kompleksnih odljevaka ili odljevaka s visokim unutarnjim napreznjima u vruću peć može rezultirati različitim toplinskim napreznjima koja mogu uzrokovati deformaciju tijekom daljnje toplinske obrade. Odljevci u peći moraju biti tako smješteni da se međusobno ne dodiruju. Nakon smještanja odljevaka u peć, brzina zagrijavanja odljevaka može biti prilično visoka. Npr. uobičajena praksa je zagrijati odljevke na 620 °C za 3 sata. Odljevci se moraju sporo hladiti (< 40 °C/h) s temperature na kojoj se provodi uklanjanje zaostalih naprezanja do sobne temperature da bi se izbjeglo ponovno stvaranje zaostalih naprezanja. Vrijeme hlađenja odljevka u kalupu prije istresanja također utječe na iznos zaostalih naprezanja.

Kod odljevka od nodularnog lijeva rijetko se zahtijeva uklanjanje unutarnjih zaostalih naprezanja. Deformacija nodularnog lijeva je elastična (osim ako nisu previsoka napreznja u odljevku), zbog čega odljevci od nodularnog lijeva zadržavaju svoju dimenziju beskonačno dugo vremena. Odljevci od nodularnog lijeva deformirati će se ako je značajan dio odljevka uklonjen strojnom obradom, jer se mijenja raspodjela naprezanja.

Temperature na kojima se provodi uklanjanje rezidualnih naprezanja nalaze se ispod temperature pretvoibe ferita, odnosno perlita u austenit. Previsoke temperature i preduga zadržavanja na visokim temperaturama mogu dovesti do smanjenja vlačne čvrstoće i tvrdoće (raspad cementita u perlitu).

Odljevke treba smjestiti u peć pri temperaturi $< 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Smještanjem kompleksnih odljevaka ili odljevaka s visokim unutarnjim napreznjima u vruću peć može rezultirati različitim toplinskim napreznjima koja mogu uzrokovati deformaciju tijekom daljnje toplinske obrade. Odljevci se ne smiju međusobno dodirivati.

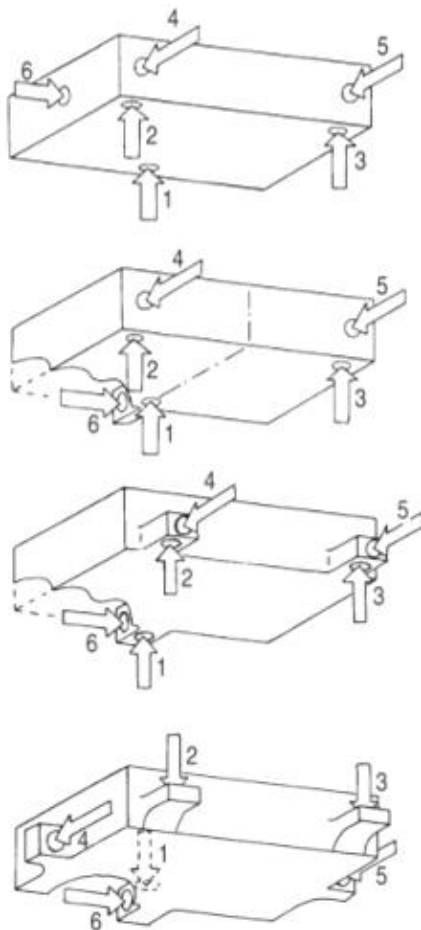
Uklanjanje zaostalih naprezanja provodi se na temperaturi od $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. brzina zagrijavanja do ove temperature treba iznositi $50 - 100\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. Vrijeme zadržavanja na temperaturi od $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ iznosi 1 h za svakih 25 mm poprečnog presjeka (debljine stjenke). Nakon toga odljevci se moraju sporo hladiti u peći brzinom $50 - 100\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ako se zahtijeva vrlo visok stupanj uklanjanja naprezanja hladiti u peći do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$) da bi se izbjeglo ponovno stvaranje naprezanja u odljevcima, zatim ukloniti odljevke iz peći i hladiti ih na zraku.

Temperatura na kojoj se uklanjaju unutarnja rezidualna naprezanja ne smije biti viša od $610\text{ }^{\circ}\text{C}$ jer strukturne promjene koje nastaju mogu utjecati na mehanička svojstva odljevaka. [8]

3.10. Točke stezanja

Nakon što je izrađen kvalitetan odljevak te se čak i toplinska obrada dobro izvršila, nekada je potrebna još i strojna obrada. Za mnogo komponenata se uzima lokacijska shema od 6 točaka, prve tri definiraju ravninu, onda dvije pomoćnu ravninu i treća zadnju ravninu, slika 12.

Točke također trebaju biti što bliže centru komponente. Na taj način smanjuju se varijacije u dužini proizvoda. [5]



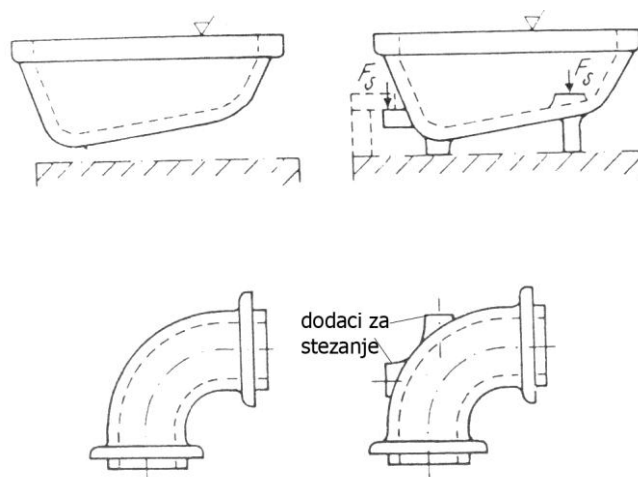
Slika 12: Potencijalne točke stezanja [5]

Elementi za stezanje sprečavaju pomicanje obratka za vrijeme obrade uslijed djelovanja sile rezanja. Oni fiksiraju prethodno određen položaj obratka u napravi. Sila stezanja, položaj sile stezanja ne smije prouzročiti deformaciju ili njihanje obratka. Smjer djelovanja sile treba biti, po mogućnosti, u smjeru obrade i nasuprot čvrstog oslonca. Obradak se ne smije odmicati od oslonca za vrijeme obrade. Sila stezanja treba biti što bliže sili rezanja da se izbjegnu deformacija i vibriranje obratka.

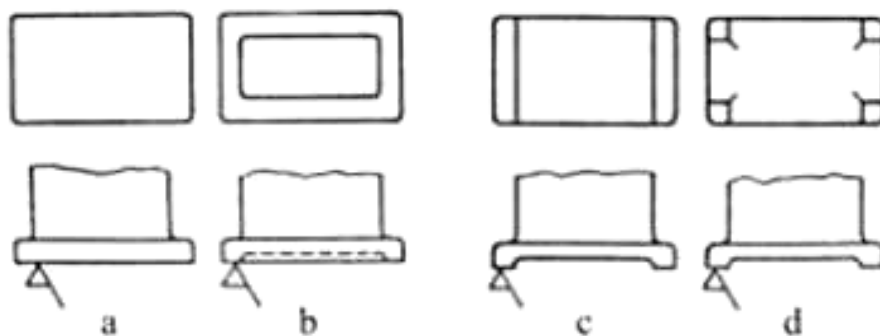
Broj sila stezanja ovisi o veličini i smjeru sile rezanja, krutosti obratka i broju oslonaca – ploha. Izbor načina proizvodnje sile ovisi o veličini sile stezanja, stupnju automatizacije proizvodnje, broju steznih mjesta i smjeru obrade. [12]

Odljevak treba oblikovati tako da **mehanička obrada** odljevka bude olakšana. To je važno zbog mogućnosti stezanja odljevka na koju treba misliti prije lijevanja. Na slici 13 se vidi odljevak bez oslonaca i s osloncima za stezanje koji će se nakon obrade odljevka odstraniti. [13]

Na slikama 14 do 16 su prikazani primjeri pravilnih i nepravilnih konstrukcija odljevaka.

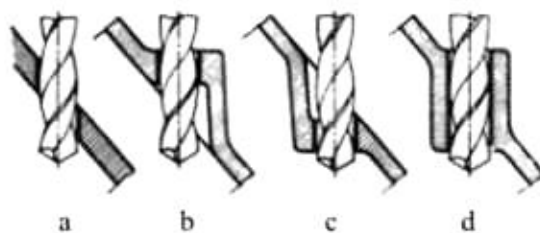


Slika 13: Odljevak bez oslonaca i s osloncima za stezanje [13]



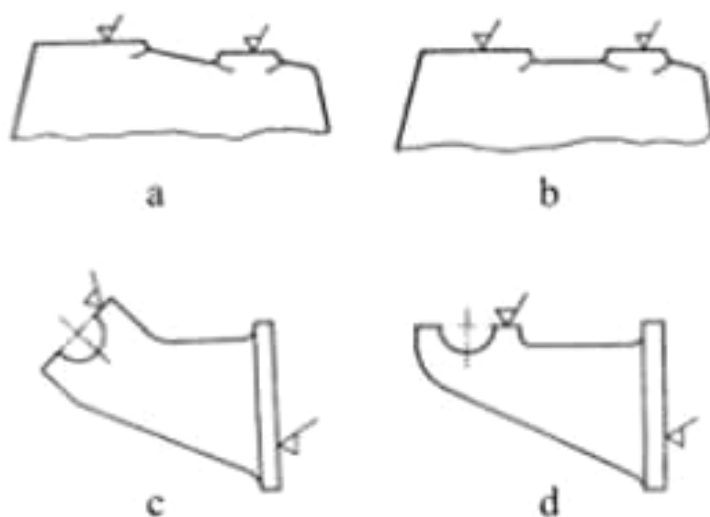
Slika 14: Površine za oslanjanje [13]

- a) Vrlo nepovoljno - obrađuje se cijela donja površina; b) Nepovoljno - obrađuje se po cijelom rubu,
- c) Povoljno - obrađuje se samo uzduž dvije stranice; d) Najbolje - obrađuju se samo oslonci na uglovima



Slika 15: Oblikovanje odljevka na mjestu bušenja [13]

a) Nepovoljno - svrdlo jednostrano opterećeno; b), c), d) Dobra konstrukcija

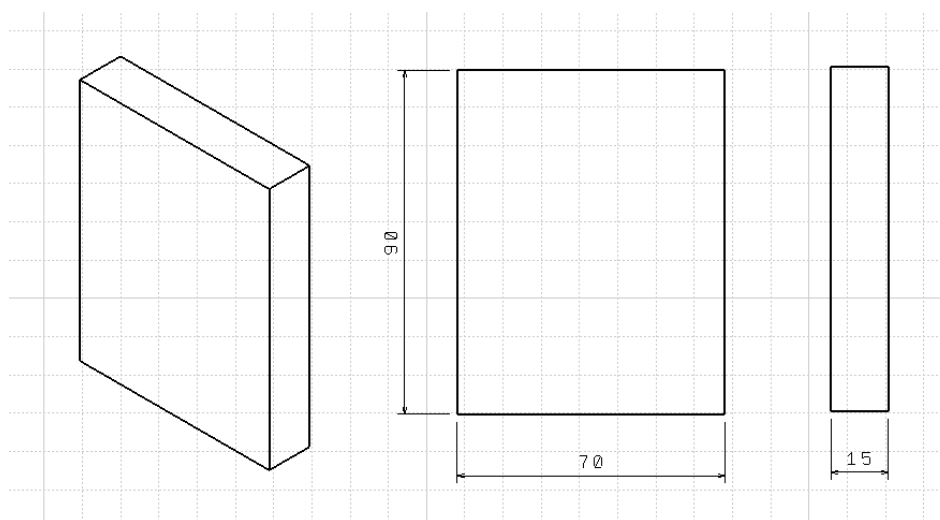


Slika 16: Položaj obrađivanih površina [13]

a) Nepovoljno - potrebno podešavanje alata; b) Povoljno - površine u ravnini; c) Nepovoljno - kose površine; d) Povoljno - obrađivane površine su međusobno okomite

4. SIMULACIJE

Kako bi prikazali neka od pravila lijevanja u ovom poglavlju se radi simulacija četiri vertikalna i tri horizontalna uljevna sustava. Provedene su simulacije lijevanja odljevka od aluminijske legure Al-Si12, dimenzije 90x70x15 mm. Cilj prikaza ovih simulacija je utvrđivanje razloga nastajanja greški prilikom lijevanja za svaku od varijanti, te na temelju toga optimizirati uljevni sustav u svrhu dobivanja što bolje kvalitete odljevka. Svi CAD modeli odljevka sa pripadajućim uljevnim sustavima su izrađeni u softwer-u CATIA V5R18 a simulacije u programu QuickCAST.



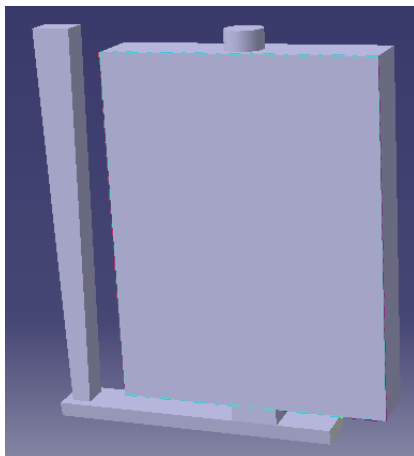
Slika 17: Dimenzije odljevka

Odljevak u svih sedam postupaka je ploča od aluminijske legure Al-Si12 dimenzija 90x70x15 mm, prikazane na slici 17.

Za provedbu simulacije prvotno je odabran vertikalni uljevni sustav sa četiri različita načina lijevanja koji su uvjetovani različitim elementima uljevnog sustava i njihovog rasporeda:

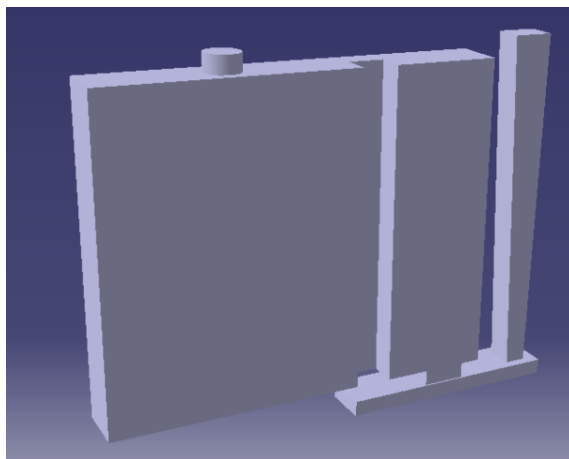
- Vertikalni uljevni sustav s ušćem odozdo uz popunjavanje kalupne šupljine
- Vertikalni uljevni sustav s ušćem odozdo – uljevanje preko pojila
- Stepenasti vertikalni uljevni sustav s uljevanjem izravno iz spusta
- Stepenasti vertikalni uljevni sustav s uljevanjem iz vertikalnog razvodnika

Slika 18 prikazuje CAD model vertikalnog uljevnog sustava s ušćem odozdo gdje se kalupna šupljina puni izravno preko razvodnika kroz jedno ušće poštivajući iskustvena pravila.



Slika 18: Vertikalni uljevni sustav s ušćem odozdo uz popunjavanje kalupne šupljine

Na slici 19 prikazana je druga verzija vertikalnog sustava s uljevanjem odozdo gdje se napajanje odljevka vrši preko pojila spojenog velikim vertikalnim ušćem. Funkcija ovog pojila jest dodatno smirivanje taljevine prije ulaska u kalupnu šupljinu u cilju što ravnomjernijeg popunjavanja kalupne šupljine i s manjom brzinom strujanja.

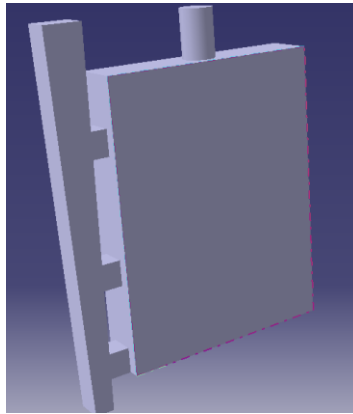


Slika 19: Vertikalni uljevni sustav sa ušćem odozdo – uljevanje preko pojila

Sljedeće dvije simulacije prikazuju lijevanje kroz stepenastu konstrukciju vertikalnog uljevnog sustava :

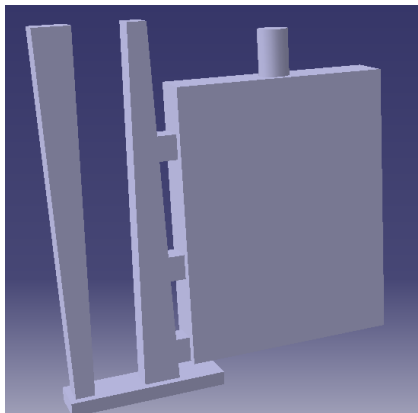
- Stepenasti vertikalni uljevni sustav s ulijevanjem izravno iz spusta ,
- Stepenasti vertikalni uljevni sustav s ulijevanjem iz vertikalnog razvodnika.

Slika 20 prikazuje izgled vertikalnog uljevnog sustava gdje taljevina popunjava kalupnu šupljinu izravno preko tri ušća. Spust je ispod posljednjeg ušća dodatno produžen kako taljevina nebi svojom najvećom brzinom protjecala u kalupnu šupljinu i kako bi se smanjio utjecaj turbulencije.



Slika 20: Stepenasti vertikalni uljevni sustav s ulijevanjem izravno iz spusta

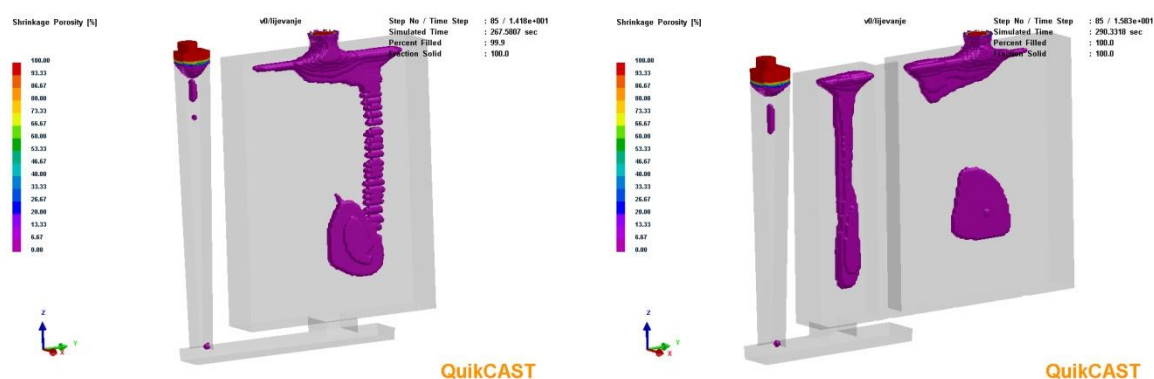
Na slici 21 taljevina prolaskom kroz spust prvo ispunjava horizontalni razvodnik pa tek nakon toga preko vertikalnog razvodnika i tri ušća ravnomjerno ispunjava kalupnu šupljinu. Vertikalni razvodnik čiji se presjek smanjuje, osigurava popunjavanje kalupne šupljine pravilnim redoslijedom na način da taljevina prolazi prvo kroz ušće najbliže ulasku u razvodnik pa onda kroz ostala ušća.



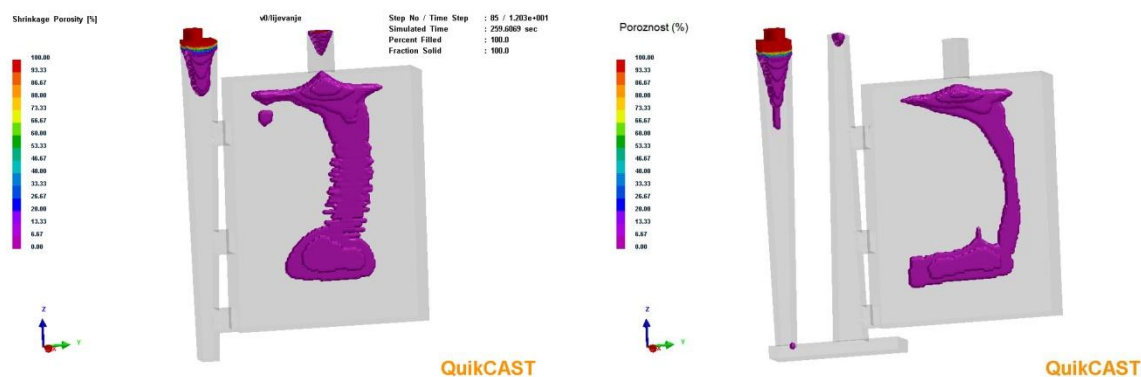
Slika 21: Stepenasti vertikalni uljevni sustav s ulijevanjem iz vertikalnog razvodnika

4.1. Prikaz mogućnosti nastanka poroznosti za odljevke lijevane vertikalnim uljevnim sustavom

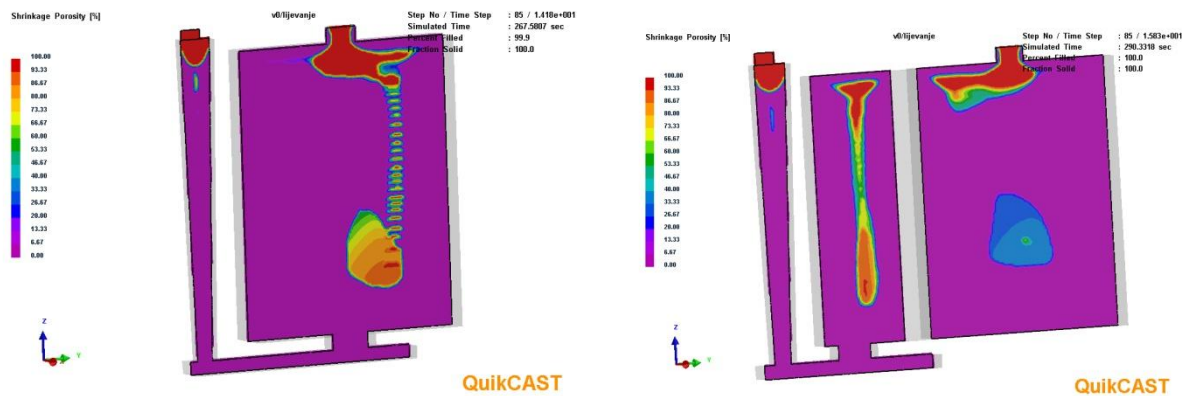
Na slikama 22 i 23 prikazana je mogućnost nastanka poroznosti u odljercima s ulijevanjem odozdo i stepenastim uljevnim sustavom. U obje varijante, odnosno u sve 4 izvedbe uljevnog sustava uočena je mogućnost nastajanja poroznosti, od sredine odljevka prema njegovoj površini.



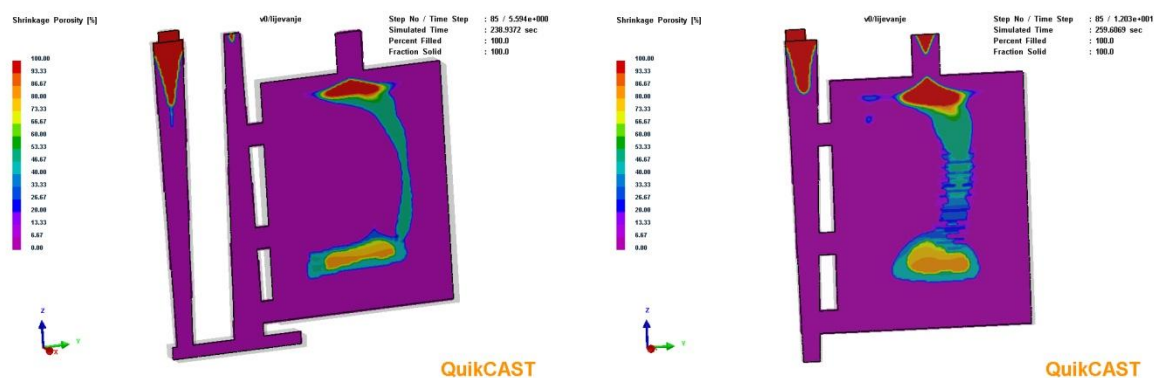
Slika 22: Poroznost u odljercima s ulijevanjem odozdo



Slika 23: Poroznost u odljercima sa stepenastim uljevnim sustavom

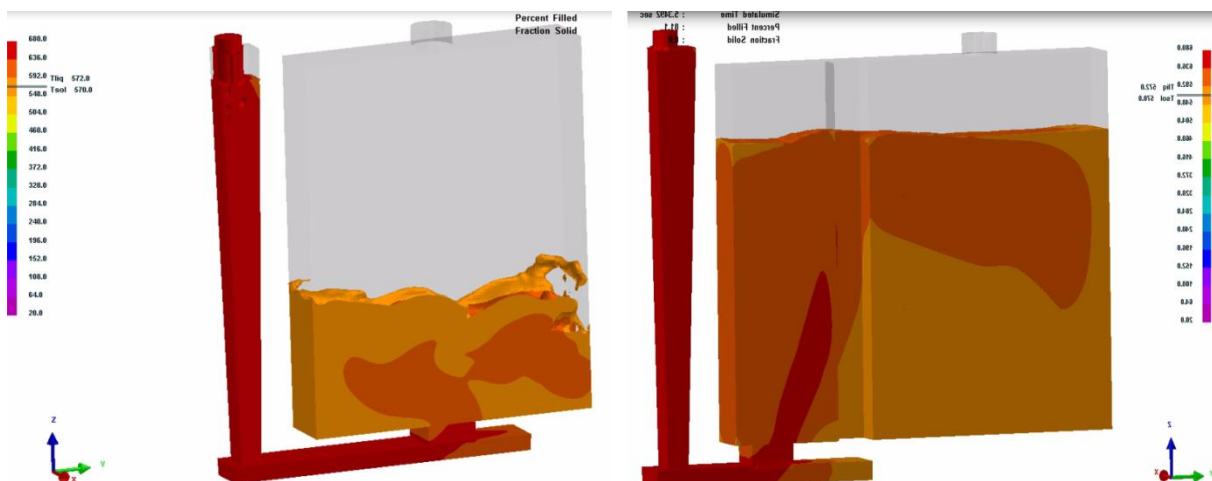


Slika 24: Vjerojatnost pojave poroznosti u odljercima s ulijevanjem odozdo

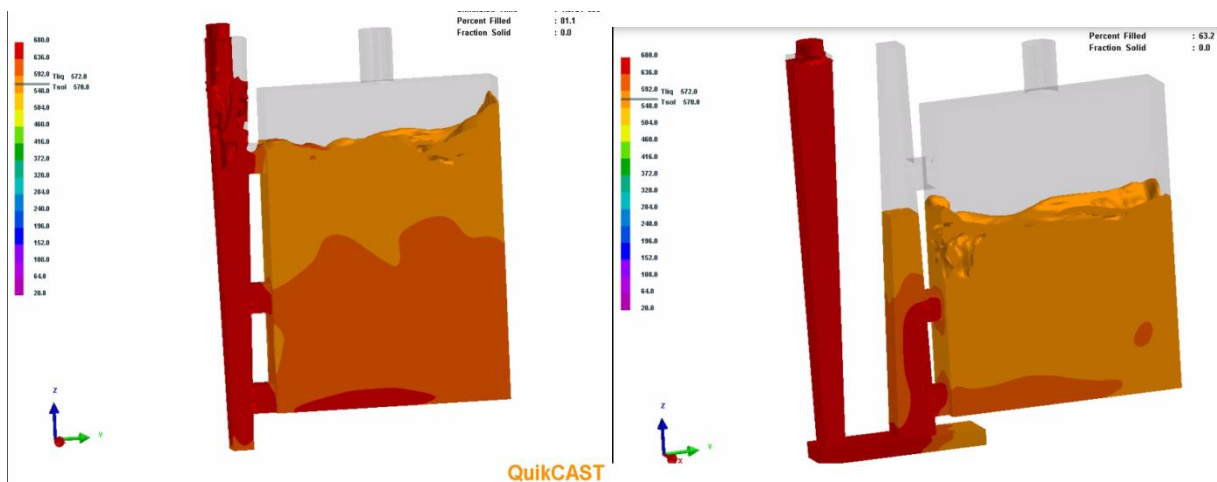


Slika 25: Vjerojatnost pojave poroznosti u odljercima sa stepenastim uljevnim sustavom

Na slikama 24 i 25 prikazana je vjerojatnost nastanka poroznosti u odljercima s ulijevanjem odozdo i stepenastim uljevnim sustavom. U obje varijante odnosno u sve 4 izvedbe uljevnog sustava pojavljuju se mjesta gdje će sigurno biti poroznosti.



Slika 26: Prikaz punjenja kalupa izravnim uljevanjem i uljevanjem preko pojila



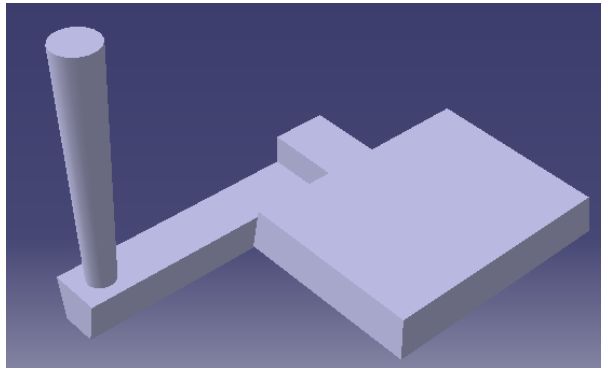
Slika 27: Prikaz punjenja kalupa za stepenasti uljevni sustav

Slike 26 i 27 prikazuju punjenje kalupa za sve četiri varijante uljevnog sustava. Vertikalni uljevni sustav sa ušćem odozdo i pojilom ima najpravnomjernije popunjavanje kalupne šupljine, zbog toga što funkcija pojila u ovom slučaju jest dodatno smirivanje taljevine prije ulaska u kalupnu šupljinu i uz što manje strujanje.

U daljnjem tekstu prikazane su tri verzije horizontalnih uljevnih sustava :

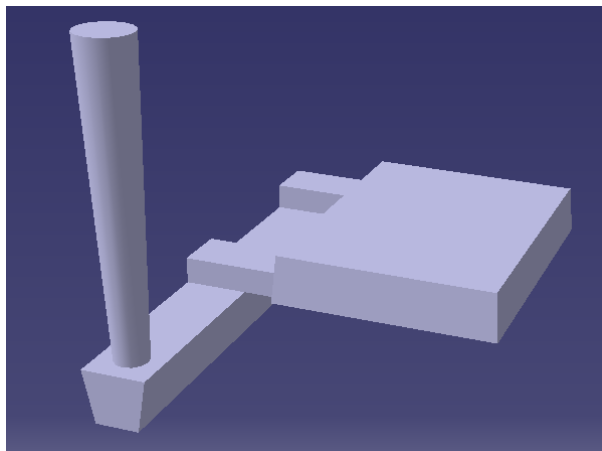
- Horizontalni uljevni sustav s jednim ušćem
- Horizontalni uljevni sustav s dva ušća
- Horizontalni uljevni sustav s dva ušća smještenih s bočne strane odljevka

Slika 28 prikazuje CAD model horizontalnog uljavnog sustava s jednim ušćem, gdje se kalupna šupljina puni izravno preko razvodnika kroz jedno ušće.



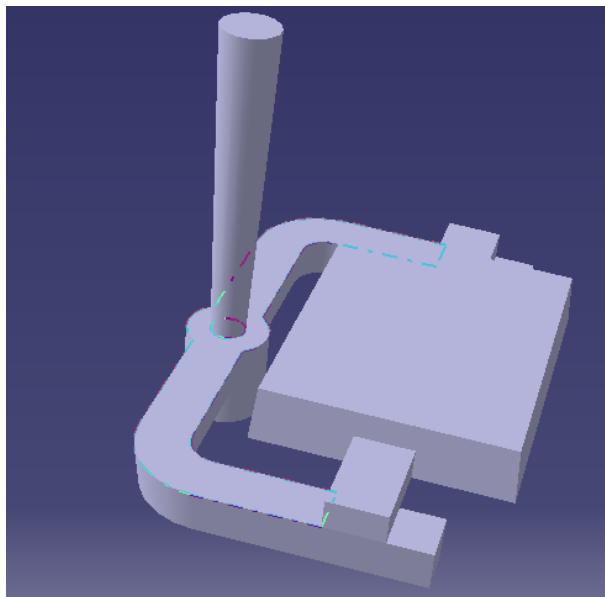
Slika 28: Horizontalni uljevni sustav s jednim ušćem

Slika 29 prikazuje CAD model horizontalnog uljavnog sustava s dva ušća, gdje se kalupna šupljina puni izravno preko razvodnika kroz dva ušća, s tim da će posljednje ušće na razvodniku zaprimiti većinu taljevine i ono će prvo dopremiti metal u kalupnu šupljinu, a ušće koje je najbliže početku razvodnika će zadnje propustiti taljevinu.



Slika 29: Horizontalni uljevni sustav s dva ušća

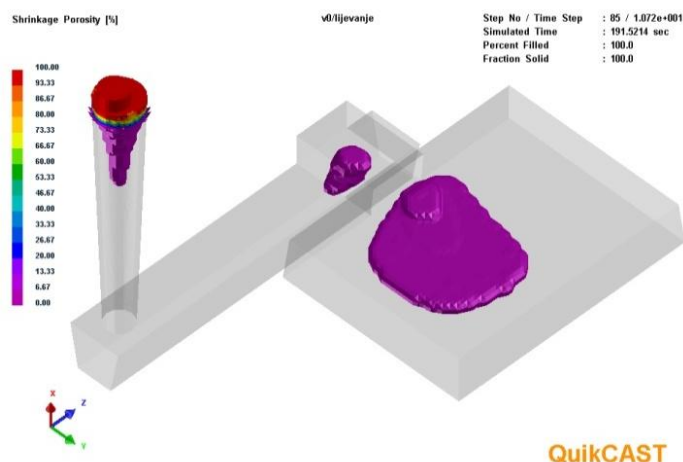
Slika 30 prikazuje CAD model horizontalnog uljevnog sustava s dva ušća smještenih s bočne strane odljevka, na dnu spusta nalazi se podnožje spusta čija je uloga smanjenje turbulencije i tendencije ka usisavanju zraka.



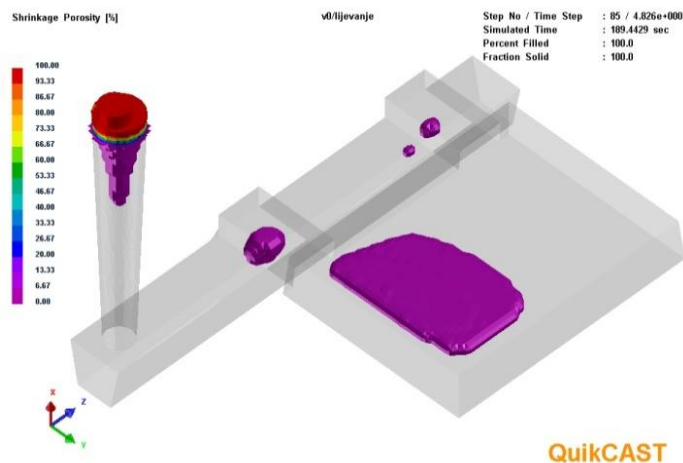
Slika 30: Horizontalni uljevni sustav s dva ušća ušća smještenih s bočne strane odljevka

4.2. Prikaz mogućnosti nastanka poroznosti za odljevke lijevane horizontalnim uljevnim sustavom

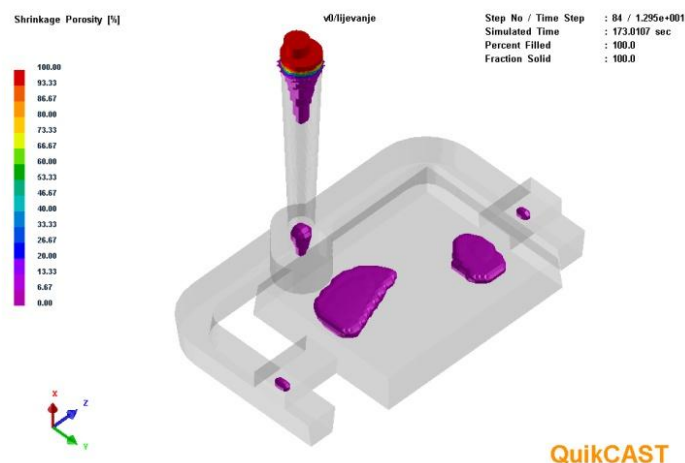
Na slikama 31 do 33 prikazana je mogućnost nastanka poroznosti u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom. U svim varijantama horizontalne izvedbe uljevnog sustava uočena je mogućnost nastajanja poroznosti prema sredini odljevka.



Slika 31: Poroznost u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom s jednim ušćem



Slika 32: Poroznost u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom s dva ušća



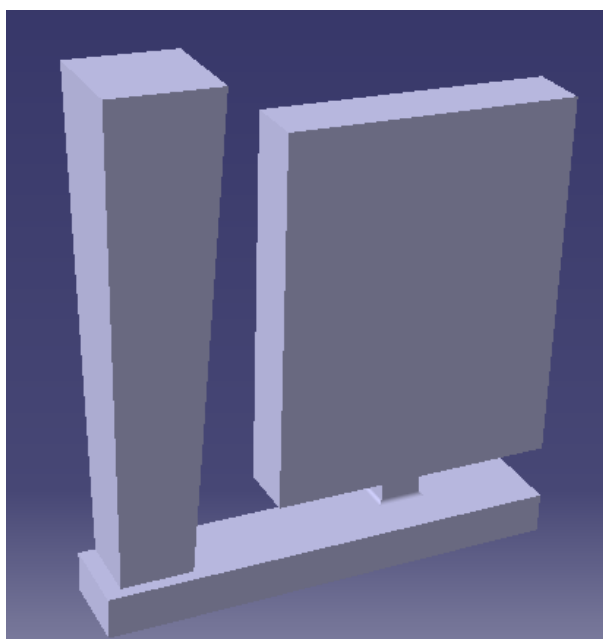
Slika 33: Poroznost u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom s dva ušća smještenih s bočne strane odljevka

Na temelju provedenih simulacija za različite uljeвне sustave i različit raspored elemenata uljevnih sustava te na temelju dobivenih rezultata o mogućnostima nastanka poroznosti kao jednog velikog problema koji se javlja u odljevcima, a nije izvana vidljiv, za eksperiment i simulaciju su odabrani vertikalni uljevni sustav s ušćem odozdo u varijantama s pojilom i bez njega, te horizontalni uljevni sustav s jednim ušćem u varijantama s toplim pojilom i bez njega u cilju dobivanja odljevka visoke kvalitete.

5. SIMULACIJE I EKSPERIMENTALNI DIO (odabranih uljevnih sustava)

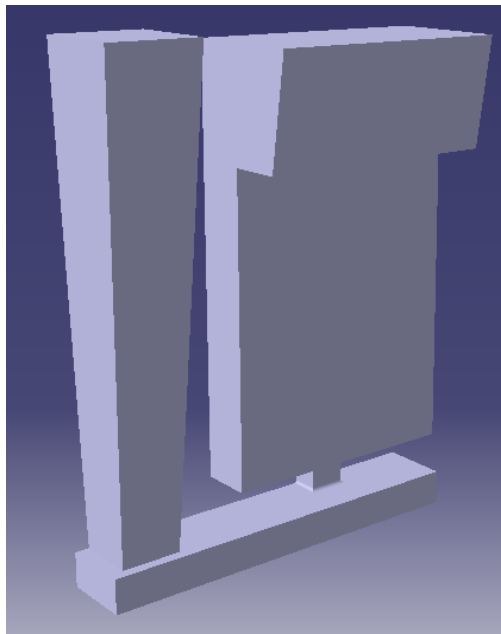
Proučavanjem pojave poroznosti u odljevku prikazane u prošlom poglavlju izrađene su simulacije lijevanja zadanog odljevka s elementima uljevnog sustava koji su istih dimenzija kao i u eksperemantalnom dijelu kako bi utvrdili podudarnost simulacije i stvarnog lijevanja.

Slika 34 prikazuje CAD model vertikalnog uljevnog sustava s ušćem odozdo gdje se kalupna šupljina puni izravno preko razvodnika kroz jedno ušće. Ovaj uljevni sustav je proširen i po tome se razlikuje se od prvotnog vertikalnog uljevnog sustava s ušćem odozdo. Svrha proširenja uljevnog sustava je smanjenje turbulencija prilikom punjenja kalupne šupljine.



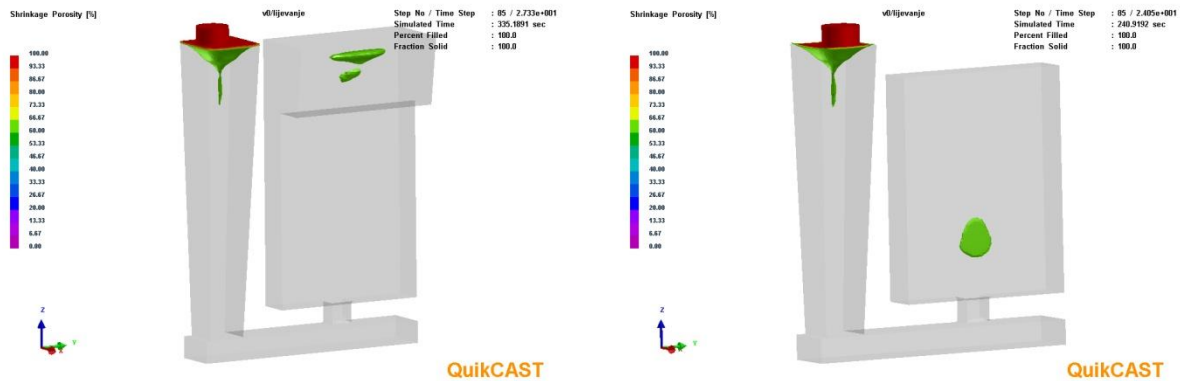
Slika 34: Vertikalni uljevni sustav s ušćem odozdo

Slika 35 prikazuje CAD model vertikalnog uljevnog sustava s ušćem odozdo i pojilom koje se nalazi na odljevku, zadatak pojila je da što duže zadrži taljevinu u rastaljenom stanju koja je potrebna za napajanje odljevka .



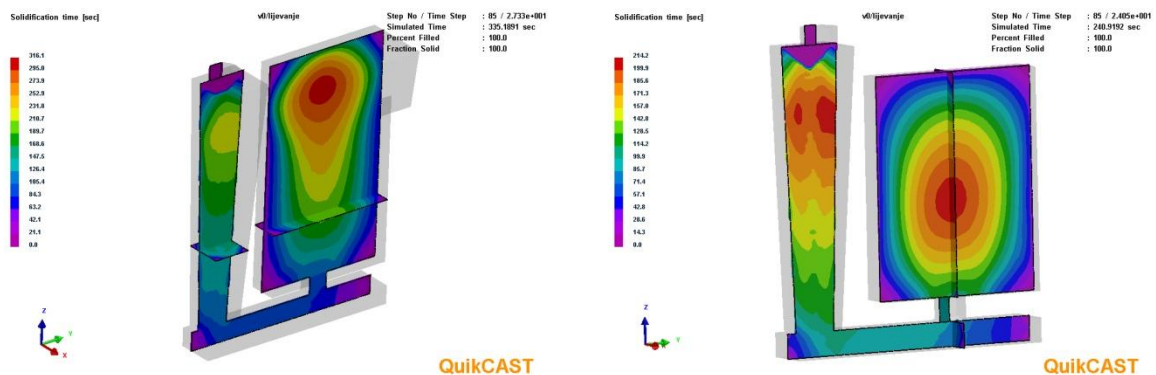
Slika 35: Vertikalni uljevni sustav sa ušćem odozdo i pojilom

Na slici 36 prikazana je mogućnost nastanka poroznosti u odljercima s vertikalnim ulijevanjem odozdo s i bez pojila. Povećanjem dimenzija uljevnog sustava smanjena je poroznost u odljevku s vertikalnim ulijevanjem odozdo, poroznost se javlja od sredine odljevka prema ušću s vjerojatnošću od 60 %. Dodavanjem pojila izbjegnuta je poroznost u odljevku.



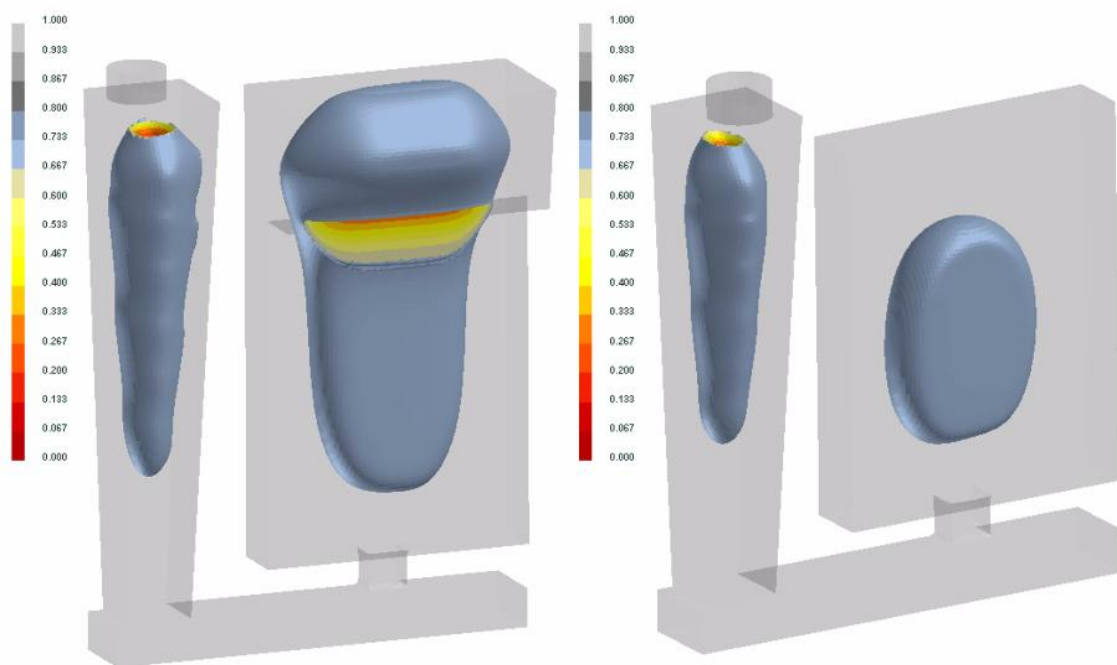
Slika 36: Poroznost u odljvcima s ulijevanjem odozdo s i bez pojila

Slika 37 prikazuje vrijeme potrebno da metal iz rastaljenog stanja postigne temperaturu solidusa, odnosno da postane stabilan u krutom stanju. Može se primjetiti i smjer hlađenja izvana prema unutra. Najprije se hlade vanjski slojevi te dolazi do skupljanja tijekom skrućivanja koje uzrokuje poroznost na mjestima zadnjeg skrućivanja



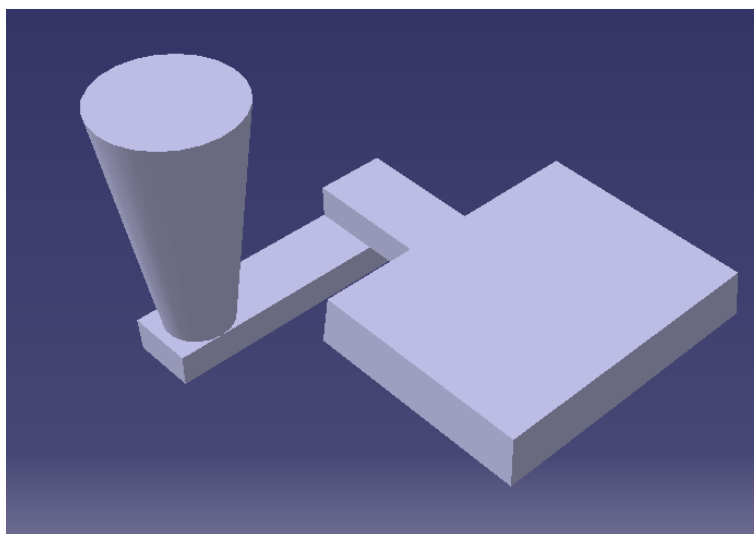
Slika 37: Vrijeme do solidusa u dvije različite varijante vertikalnog uljevnog sustava s i bez pojila

Slika 38 prikazuje završna mjesta skrućivanja u dvije različite varijante vertikalnog uljevnog sustava s i bez pojila. Za slučaj s pojilom, zadnje mjesto skrućivanja zbiva se unutar pojila što je poželjno za proces llijevanja jer tada pojilo ispunjava svoju funkciju i u potpunosti napaja odljevak. Za slučaj bez pojila zadnje mjesto skrućivanja nalazi se u sredini odljevka.



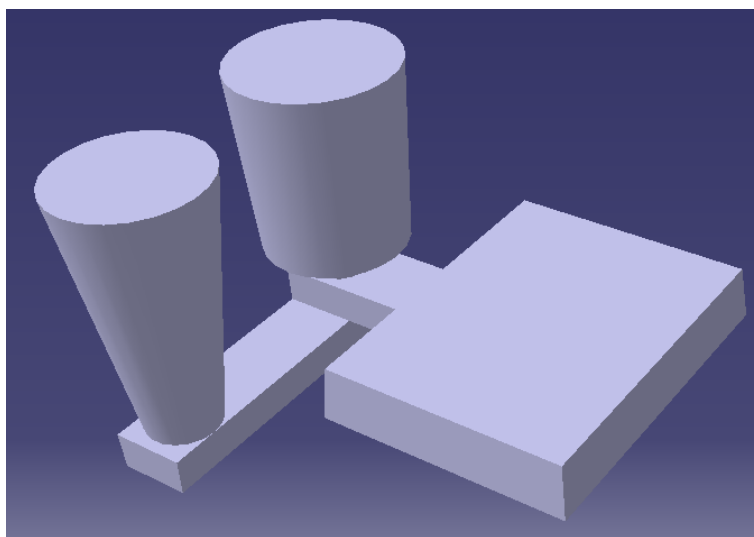
Slika 38: Završna mjesta skrućivanja u dvije različite varijante vertikalnog uljevnog sustava sa i bez pojila

Slika 39 prikazuje CAD model horizontalnog uljevnog sustava s jednim ušćem s odgovarajućim dimenzijama uljevnog sustava koji će se lijevati u eksperimentu, gdje se kalupna šupljina puni izravno preko razvodnika kroz jedno ušće .



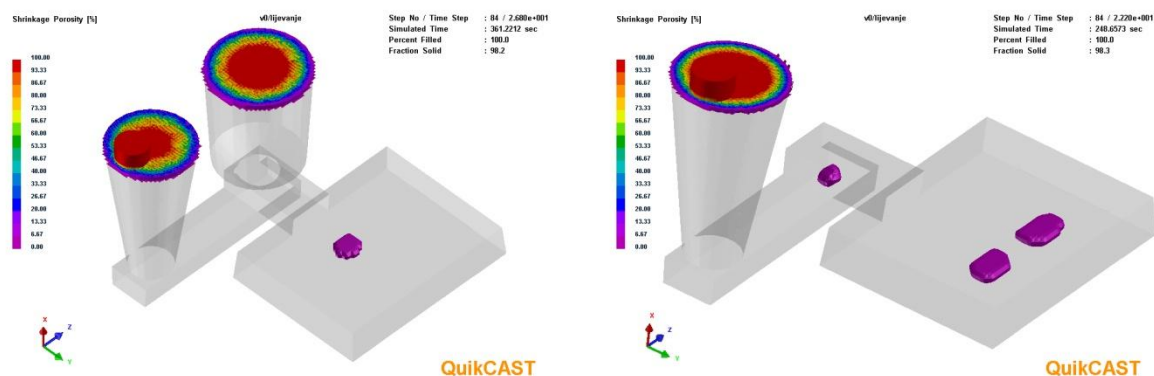
Slika 39: Horizontalni uljevni sustav s jednim ušćem

Slika 40 prikazuje CAD model horizontalnog uljavnog sustava s jednim ušćem i toplim pojilom kod kojeg taljevina na putu prema kalupnoj šupljini najprije prolazi kroz pojilo tako da toplo pojilo ostaje popunjeno najtoplijom taljevinom što povoljno utječe na napajanje.

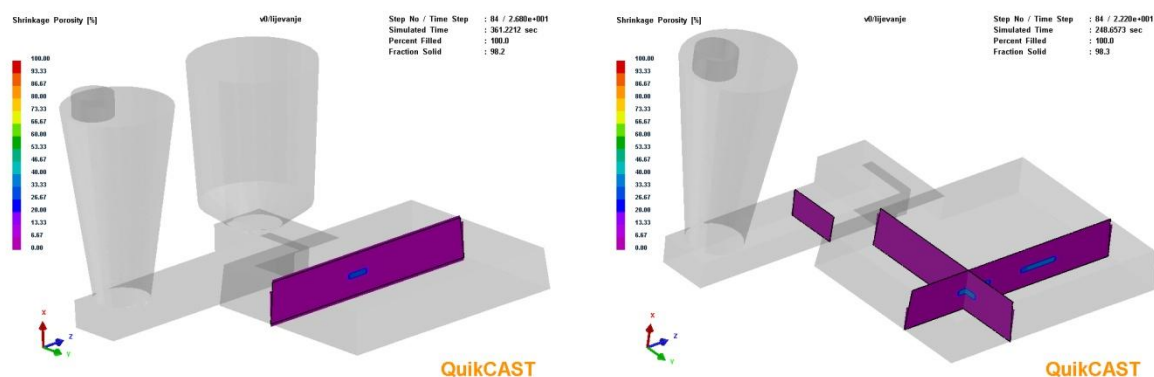


Slika 40: Horizontalni uljevni sustav s jednim ušćem i toplim pojilom

Na slikama 41 i 42 prikazana je mogućnost nastanka poroznosti u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom. U obje varijante horizontalne izvedbe uljevnog sustava uočena je mogućnost nastajanja poroznosti od ušća prema sredini odljevka. Vidljivo je da u slučaju bez toplog pojila dolazi do povećanja poroznosti.

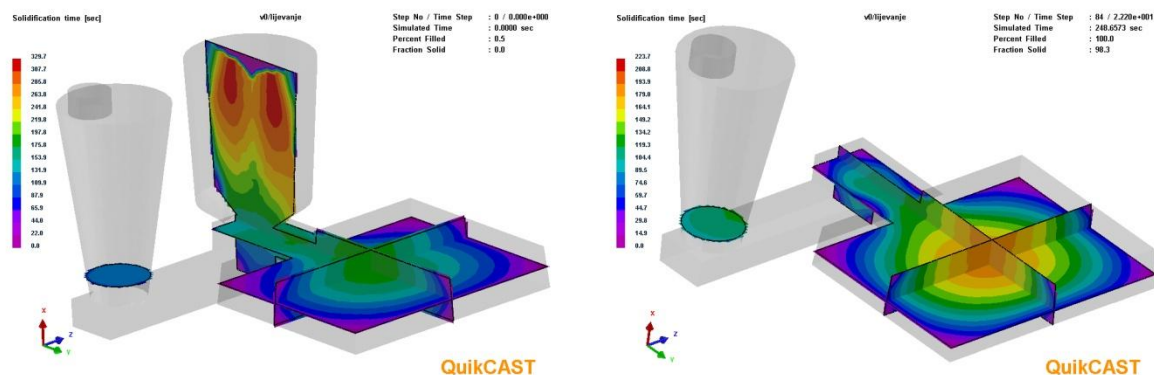


Slika 41: Poroznost u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom s jednim ušćem i toplim pojilom te bez njega



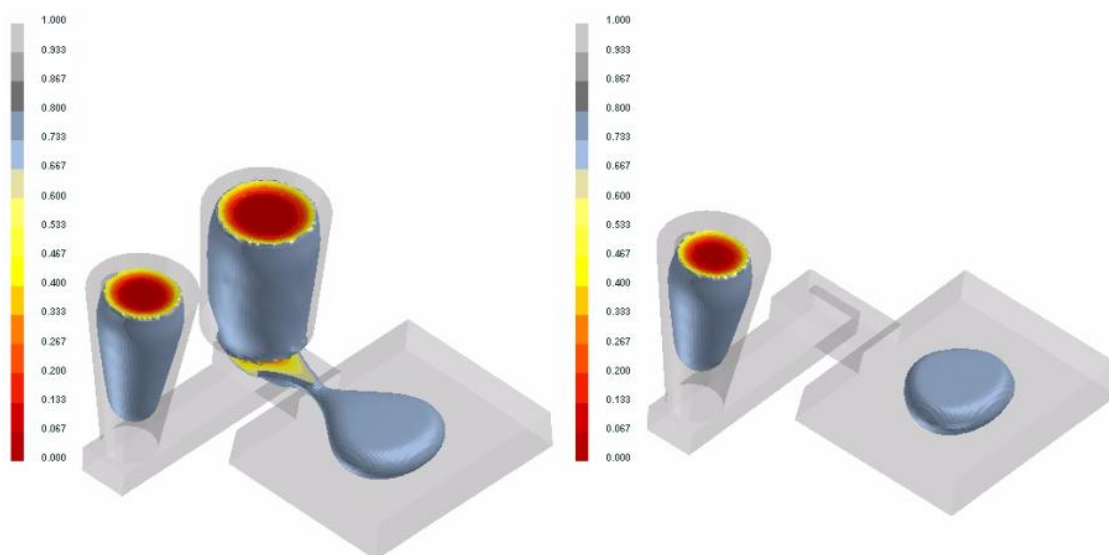
Slika 42: Poroznost u odljevcima s horizontalnim uljevnim sustavom s jednim ušćem i toplim pojilom te bez njega - 2D prikaz

Na slici 43 prikazano je vrijeme potrebno za postizanje temperature solidusa. Za slučaj s pojilom taljevina se zadnja skrutne u pojilu.



Slika 43: Vrijeme do solidusa u dvije različite varijante horizontalnog uljevnog sustava s jednim ušćem s toplim pojilom i bez njega

Slika 44 prikazuje završna mjesta skrućivanja u dvije različite varijante horizontalnog uljevnog sustava s i bez toplog pojila. Za slučaj s pojilom, zadnje mjesto skrućivanja zbiva se unutar pojila što je poželjno za proces lijevanja jer tada pojilo ispunjava svoju funkciju i u potpunosti napaja odljevak. Za slučaj bez pojila zadnje mjesto skrućivanja nalazi se u sredini odljevka. Na mjestima koja se zadnja skrućuju dolazi do pojave poroznosti.



Slika 44: Završna mjesta skrućivanja u dvije različite varijante horizontalnog uljevnog sustava s i bez toplog pojila

5.1. Izrada kalupa za lijevanje

Izrada kalupa za lijevanje aluminijske ploče započela je nakon konstruiranja i izrade modela. Prilikom dimenzioniranja modela razvodnika, spusta, ušća i pojila poštivana su pravila konstruiranja uljevnih sustava i iskustveni omjeri između dimenzija elemenata sustava. Postupak izrade jednokratnih pješčanih kalupa objašnjen je koracima prikazanim slikama 45 - 58. Nakon izrade drvenih elemenata uljevnog sustava i modela, u kalup se stavlja model s razvodnikom, ušćem i pojilom. Zatim se posipava likapodijem kako bi se olakšalo vađenje modela iz kalupa. Potom se u kalup nasipava pijesak. Nakon što se kalup ispuni pijeskom te se dobro sabije, kalup se okreće. Zatim sljedi vađenje modela i svih elemenata uljevnog sustava. Gornji dio kalupa stavlja se na donji te se pričvrste jedan za drugi. Lijevana je aluminijska legura Al - Si12. Kako bi se takva legura mogla uliti u kalup potrebno ju je najprije rastaliti u peći za taljenje. Kako ne bi došlo do prevelikog gubitka topline prilikom prenošenja taljevine od peći do mjesta ulijevanja, lonac za lijevanje se najprije predgrijava plinskim plamenom. Neposredno prije ulijevanja potrebno je provjeriti temperaturu taljevine pirometrom. Nakon što se utvrdi zahtjevana temperatura lijevanja, taljevina je spremna za ulijevanje u kalup. Nakon cijelog procesa potrebno je očistiti ostatke materijala iz peći. Nakon hlađenja odljevaka obavljena je vizualna kontrola kvalitete.



(a)



(b)

Slika 45: Izgled vertikalnog uljevnog sustava u kalupu s pojilom (a) i bez pojila (b)



(a)



(b)

Slika 46: Izgled horizontalnog uljevnog sustava u kalupu s tplim pojilom (a) i bez pojila (b)



(a)



(b)

Slika 47: Nanošenje modelnog i dopunskog pijeska (a) i sabijanje kalupne mješavine (b)



(a)



(b)

Slika 48: Izgled vertikalnog uljevnog sustava u kalupu s pojilom (a) i bez pojila (b) nakon vađenja modela

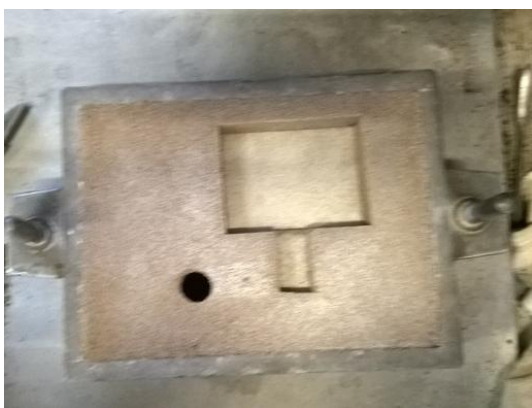


(a)



(b)

Slika 49: Izgled horizontalnog uljevnog sustava u kalupu s toplim pojilom, gornji kalup (a) i donji kalup (b) nakon vađenja modela



(a)



(b)

Slika 50: Izgled horizontalnog uljevnog sustava u kalupu, gornji kalup (a) i donji kalup (b) nakon vađenja modela



Slika 51: Izgled kalupa spremnih za lijevanje za vertikalni uljevni sustav



(a)



(b)

Slika 52: Izgled kalupa spremnih za lijevanje za horizontalni uljevni sustava, s toplim pojilom (a) i bez toplog pojila (b)



(a)



(b)

Slika 53: Izgled peći za taljenje aluminija (a) i prikaz temperature peći (b)



(a)



(b)

Slika 54: Odstranjivanje nečistoća iz taljevine (a) i prikaz temperature taljevine (b)



(a)



(b)

Slika 55: Zagrijavanje lijevarskog lonca (a) i prikaz temperature taljevine neposredno prije lijevanja (b)



(a)



(b)

Slika 56: Lijevanje rastaljenog aluminija u horizontalni uljevni sustav (a) i lijevanje rastaljenog aluminija u vertikalni uljevni sustav (b)

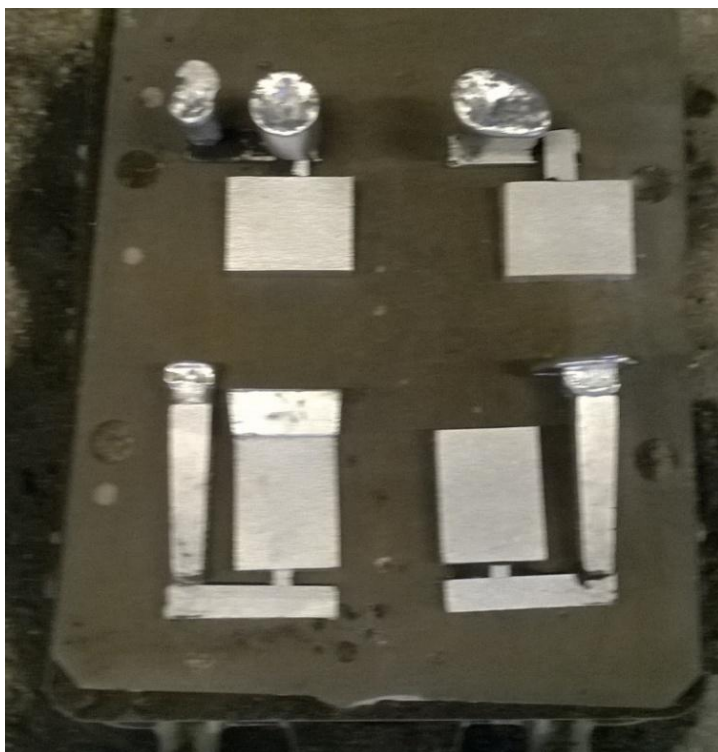


(a)



(b)

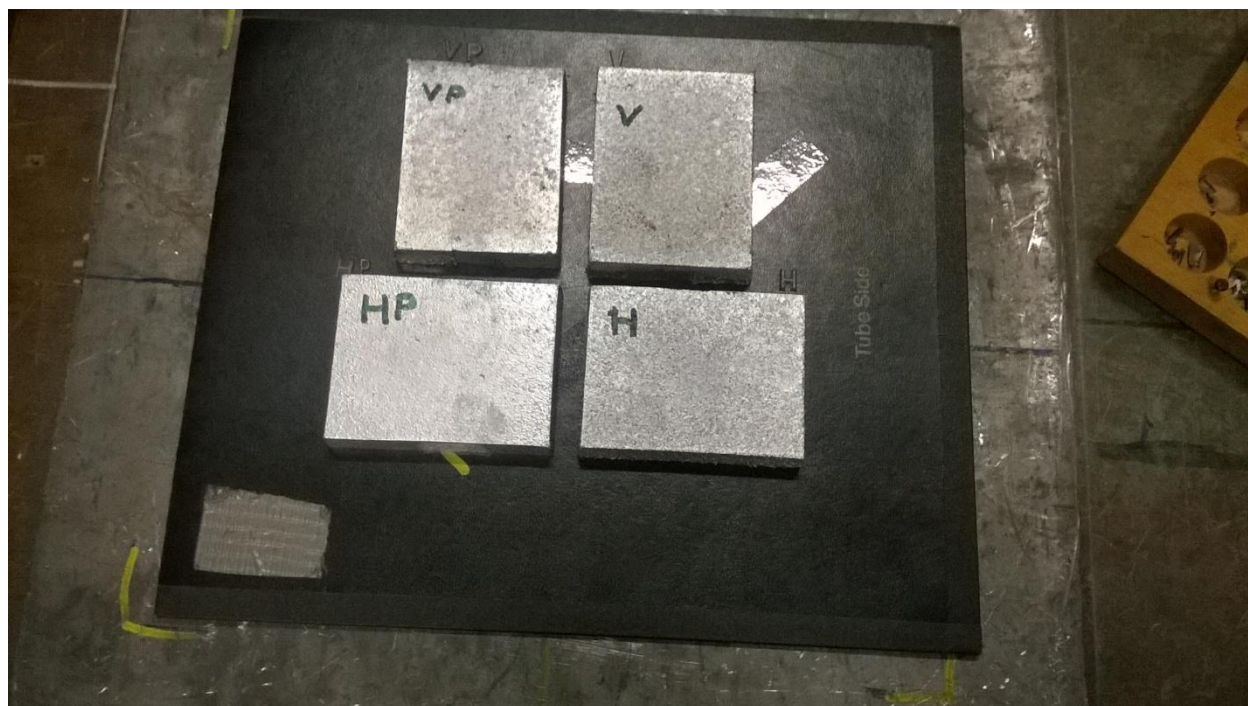
Slika 57: Izgled kalupa nakon lijevanja (a) i rastresanje kalupa (b)



Slika 58: Izgled odljevaka nakon lijevanja sa svim elemntima uljevnog sustava

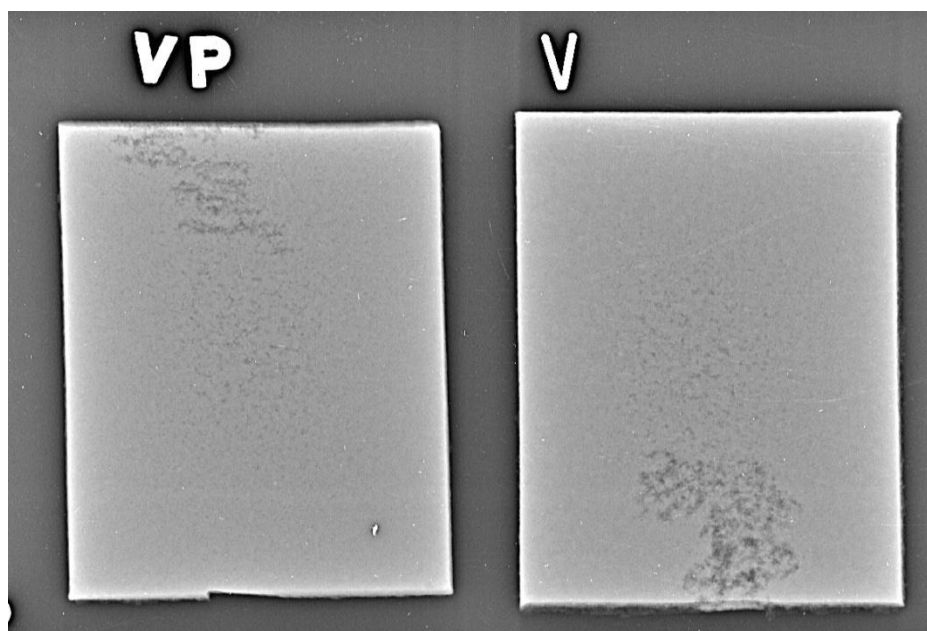
5.2. Analiza poroznosti odljevka

Radiografskom kontrolom dobiva se podatak o šupljinama koje ostaju u odljevku. U Laboratoriju za nerazorna ispitivanja obavljena su radiografska ispitivanja na rentgenu. Na slici 59 su prikazani odljevci spremni za radiografsko ispitivanje na rentgenu.



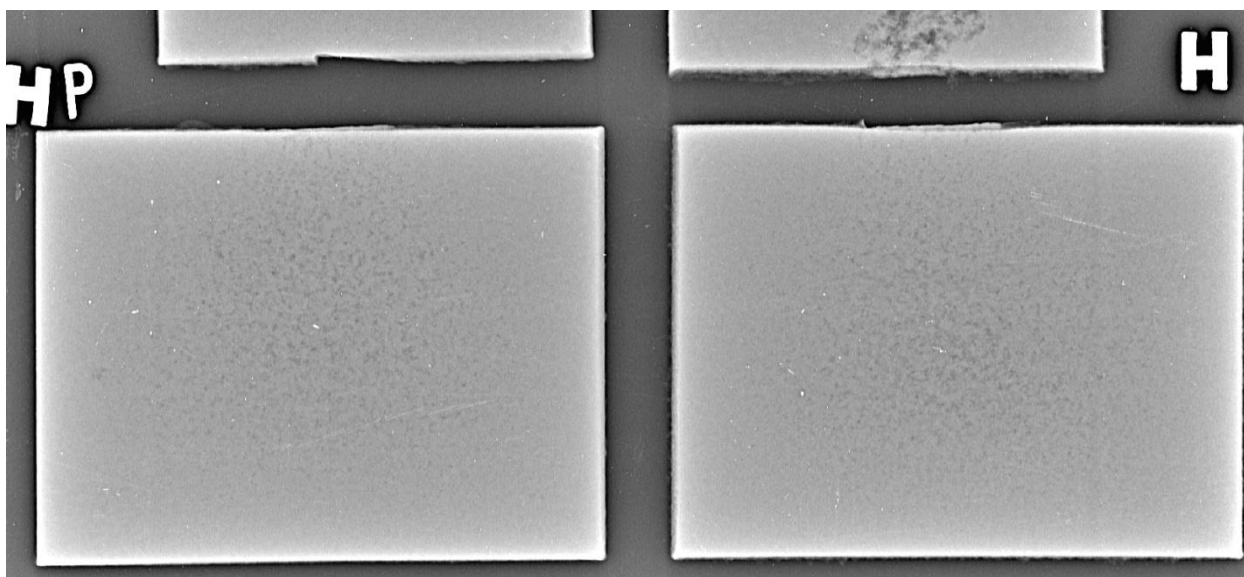
Slika 59: Prikaz odljevaka spremnih za radiografsko ispitivanje na rentgenu

Rentgenska analiza dobivenih odljevaka potvrdila je nepravilnosti koje nisu uočene samim vizualnim pregledom odljevaka nakon lijevanja. Analiza je potvrdila poroznost u svim odljevka. Kod vertikalnog uljevnog sustava poroznost se javlja na donjoj strani odljevka prema ušću kako je simulacija i predvidila, a kod vertikalnog uljevnog sustava poroznost se pokazala na gornjoj strani odljevka prema pojilu iako na simulaciji nije prikazana. Moguće odstupajne od rezultata rentgenske analize i simulacije je moguća zbog toga što se koristila različita taljevina u simulaciji i pri stvarnom lijevanju odljevka. Radiogram odljevaka izlivenih vertikalnim uljevnim sustavom prikazana je na slici 60.



Slika 60: Radiogram odljevaka dobivenih vertikalnim uljevnim sustavom s pojilom (VP) i bez njega (V)

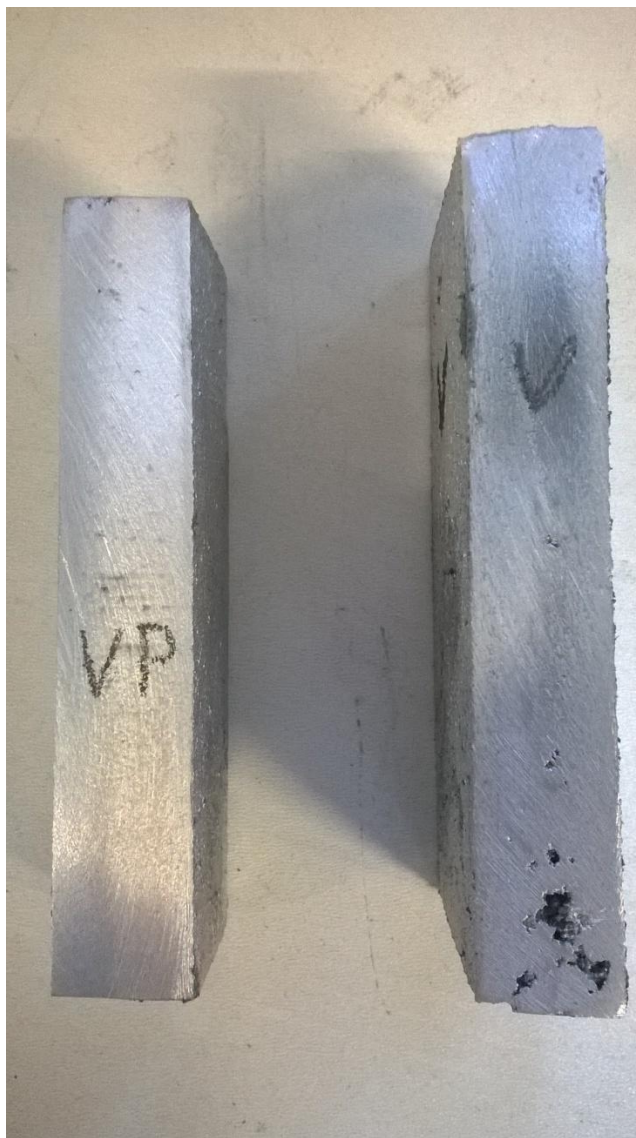
Kod horizontalnog uljevnog sustava uočena je dosta sitnija poroznost koja prekriva veći dio površine odljevka. Radiogram odljevka izlivenih horizontalnim uljevnim sustavom prikazana je na slici 61.



Slika 61: Radiogram odljevaka dobivenih horizontalnim uljevnim sustavom s pojilom (HP) i bez njega (H)

5.3. Analiza rezultata lijevanja

Rezanjem odljevaka uočena je poroznost. Odljevak bez poroznosti mogao bi se dobiti upotrebom pojila većeg volumena. Pogreške na odljevcima lijevanim vertikalnim uljevnim sustavom prikazane su na slici 62.



Slika 62: Poroznost skupljanja za vertikalni uljevni sustav vidljivi na poprečnom presjeku

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisana su pravila lijevanja te pojave unutar kalupa do kojih dolazi prilikom procesa lijevanja. Opisane su najčešće greške do kojih dolazi ukoliko se ne pridržava pravila te kako ih izbjeći.

U poglavlju simulacije izrađeno je sedam CAD modela za zadani odljevak, četiri vertikalna i tri horizontalna uljevna sustava te su napravljene simulacije lijevanja na zadanim modelima kako bi utvrdili sve mogućnosti nastanka pogrešaka na odljevcima. Utvrđivanjem pogrešaka nakon izvršenih simulacija lijevanja i proučavanjem njihovih izvora odabrani su najčešći korišteni uljevni sustavi i primjenom pravila ih poboljšali. Napravljeni su novi poboljšani CAD modeli uljevnih sustava i primjećeno je kako dolazi do smanjenja poroznosti i pravilnog skrućivanja. Najbolji primjer poboljšanja je vertikalni uljevni sustav s uljevanjem odozdo gdje je dodavanjem pojila na vrh odljevka skroz eliminirana poroznost u odljevku. Dokazano je kako su rezultati simulacije u velikoj mjeri u skladu s rezultatima dobivenim stvarnim lijevanjem, a određena mala odstupanja do kojih dolazi moguća su zbog različite taljevine koja je korištena u simulaciji i stvarnom lijevanju. U primjeru vertikalnog uljevnog sustava s ušćem odozdo primjećena je najveća poroznost od svih korištenih uljevnih sustava, koja se pojavljuje od sredine odljevka prema ušću.

Kod vertikalnog uljevnog sustava s ušćem odozdo i pojilom na vrhu odljevka primjećena je poroznost od sredine prema vrhu odljevka u ne tako velikoj mjeri kao u slučaju bez pojila, koja bi se mogla izbjeći postavljanjem većeg pojila.

U horizontalnom uljevnom sustavu s toplim pojilom i bez njega primjećena je mala sitna poroznost koja se često javlja kod lijevanja aluminija.

LITERATURA

- [1] Bonačić Mandinić, Z. , Budić, I.: Osnove tehnologije kalupljenja, Jednokratni kalupi I. Dio, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2001.
- [2] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [3] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [4] Budić, I.: Posebni lijevački postupci, II. dio, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2009.
- [5] Jolly, M.: Prof. John Cambells Ten rules for Making Reliable Castings, 57(2005)5,19-28.
Dostupno na: <http://www.atilim.edu.tr/~kazim.tur/mate401/Dosyalar/61-JOM-CampbellRules.pdf> (25.4.2015)
- [6] Unkić, F., Glavaš, Z.: Osnove lijevanja metala, Sisak, 2009.
- [7] Unkić, F., Glavaš, Z.: Lijevanje željeznih metala, Sisak, 2008.
- [8] Campbell, J., Harding, A.: The Filling of Castings, The University of Birmingham, 1994.
- [9] Hasse, S.: Pogreške na odljevcima, Zagreb, 2003.
- [10] Campbell J., Harding R.A.:The Feeding of Castings, TALAT Lecture 3206, EAA-European Aluminium Association, 1994
- [11] Unkić, F., Glavaš, Z.: Osnove lijevanja metala,Zbirka rješениh zadataka, Sisak, 2009.
- [12] Dostupno na: <http://www.ss-industrijska-strojarska-zg.skole.hr/upload/ss-industrijska-strojarska-zg/multistatic/78/11.%20Naprave.pdf> (20.03.2015.)
- [13] Dostupno na :
http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_kons_stroj/katedre/konstruiranje/kolegiji/kio/kio_materijali_pr/Lijevanje.pdf (20.03.2015.)

PRILOZI

- I. CD-R disc